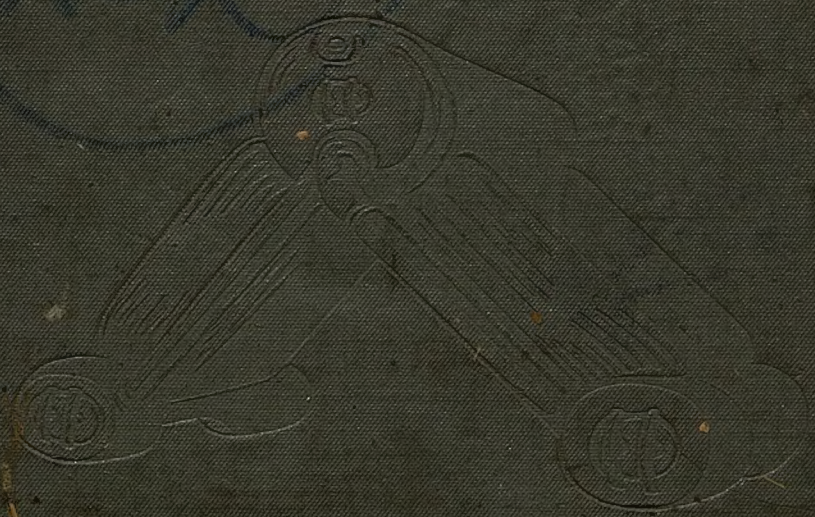
359В2
Б 25

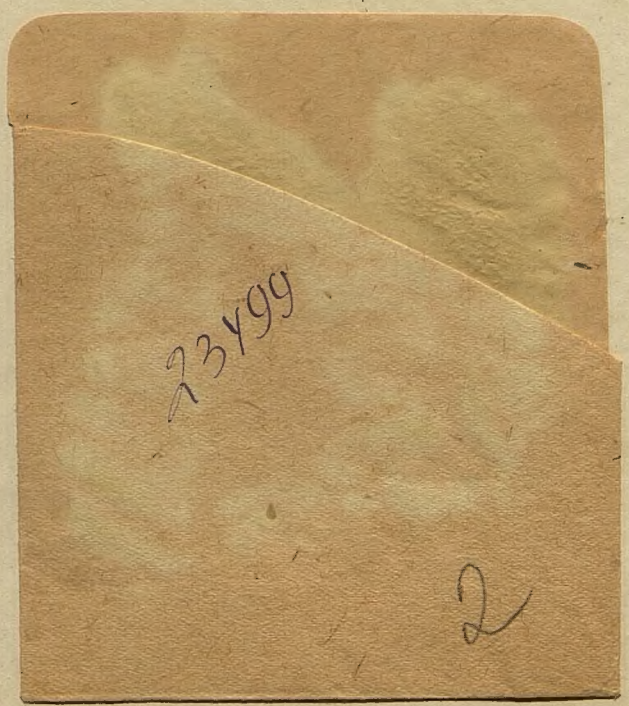
Н. А. БАРАШ

РАЗВИТИЕ судовых паровых котлов

202



ОНТИ · 1937


23499
2

ПРОВЕРЕНО 1960 г.

ПРОВЕРЕНО 1958 г.

359.82
Б24

П. А. БАРАШ

ИНЖЕНЕР-МЕХАНИК

Проверено | 2015

РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Под ред. проф. В. В. ДАНИЛЕВСКОГО

ФИЛИАЛ Центральной ВМБ

№ 31499

757

Фундаментальная В.М.П.У. библиотека

60471

11341 66

11341

Фундаментальная военно-морская библиотека ЦП ВМС

КУРСЫ Ускоренной Подготовки КОМАНДНОГО СОСТАВА Мор. Сил. Бал. Моря

Цена 12 р., переплет 2 р.

ОНТИ — НКТП — СССР

РЕДАКЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ЛЕНИНГРАД 1937 МОСКВА

4906

ПОДАЛ

Б-24

ТКК № 87 от 13/II—1937 г.

АННОТАЦИЯ

Книга инж. Бараш «Развитие судовых паровых котлов» показывает на большом фактическом материале исторический путь развития судового котлостроения от самой первой мысли об использовании пара на службу человечеству до наших дней. В книге дается описание развития всех основных конструкций судовых котлов. Книга изложена популярным языком и иллюстрирована большим количеством рисунков, диаграмм и таблиц.

Книга предназначена для инженерных кадров, а также может служить учебным пособием для студентов, желающих углубить свои знания по судовым котлам с точки зрения их исторического развития.

Автор книги инж. Бараш является преподавателем Военно-Морского инженерного училища им. Дзержинского.

Редактор *В. В. Данилевский.* Техн. редактор *Г. А. Сухович.*

Сдано в набор 4/XII 1936 г. Подписано в печать 23/II 1937 г.
Формат бумаги 72×110 1/16. Уч.-авт. л. 50. Бум. лист. 19 3/4 + 1 вклейка.
Тип. зн. в 1 бум. листе 110592. Тираж 2000 экз. Заказ № 4081.
Индекс С-С-5-3. Ленгорлит № 644. Выход в свет март 1937 г.

2-я типогр. ОНТИ имени Евгении Соколовой. Ленинград, просп. Красных Командиров, 29.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Практическое открытие превращения механической энергии в тепловую и тем самым овладение человеком впервые неорганической силой природы — добывание огня трением — датирует, по Энгельсу [1], начало человеческой истории. Практическое же открытие способов обратного превращения тепловой энергии в механическую, осуществленное в XVIII в. после работ Папина, Севери, Ньюкомена и особенно Джемса Уатта, знаменовало вступление человечества в новую эпоху — эпоху крупной машинной индустрии. 1784 г. датирует Маркс создание парового двигателя в том виде, как он был необходим капиталистическому производству. Промышленный переворот с этого момента получает содержание нового качества, и это качество стремительно перерастает в изумительное количество машинизма, охватывающего за несколько десятков лет весь мир. Капитал нашел в паровом двигателе Уатта могучее средство для выполнения своих задач. Энергетические потоки, посланные паровым двигателем, обежали по всем отраслям промышленности все этажи, все закоулки капиталистических фабрик, завоевывая каждый год новых подданных «его величеству пару».

Утвердив свою власть на капиталистической фабрике, пар начал завоевывать для капитала новые территории, революционизируя транспортные средства.

«Пар произвел переворот в путях сообщения не только на земле, но и на воде», — пишет Энгельс [2] и сразу же отмечает постройку Фультоном в 1807 г. парохода «Clermont», впервые оказавшегося пригодным для длительной и регулярной эксплоатации.

Этому моменту предшествовала почти вековая предистория попыток применить пар на водном транспорте. Еще 21 декабря 1736 г. англичанин Джонатан Гулль (Jonathan Hulls) получил первый патент на пароход с гребными колесами, вращаемыми пароатмосферной машиной Ньюкомена. Но только с шестидесятых годов XVIII в. начинается переход к попыткам постройки судов, приводимых в движение огненными машинами. На страницы истории парохода вписывают в XVIII в. свои имена пионеры нового дела — Женевуа, Колле, Перье, Жофруа, Румсей, Фитч, Тейлор, Симингтон, Барлоу и многие другие. Лишь в начале XIX в. удалось при помощи машины Уатта двойного действия создать паровые суда, пригодные для длительной и регулярной эксплоатации. Двигатель «Clermont'a» был построен именно на заводе Болтона и Уатта в Сохо.

---

[1] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Соч. М. и Э., т. XIV, стр. 569.
[2] Ф. Энгельс. Положение рабочего класса в Англии. М и Э., т. III, стр. 313.

С этого момента кривая развития парового транспорта начинает быстро итти вверх, начинается эпоха борьбы парового и парусного флота. Весьма показательно в этом смысле сопоставление прироста по десятилетиям тоннажа мирового торгового и парусного флота:

Десятилетие	Прирост тоннажа пароходов в %	Прирост тоннажа парусных судов в %	Прирост тоннажа в целом мирового торгового флота в %
1820—1829	+ 17,10	— 0,49	— 0,41
1830—1839	+ 11,75	+ 1,71	+ 1,84
1840—1849	+ 8,37	+ 3,28	+ 3,41
1850—1859	+ 12,63	+ 3,93	+ 4,32
1860—1869	+ 8,44	+ 1,60	+ 1,75
1870—1879	+ 9,11	+ 0,03	+ 1,62
1880—1889	+ 9,00	— 2,20	+ 0,7
1890—1899	+ 6,3	— 2,9	+ 2,8

Также показательно, хотя, правда, только лишь количественно, сопоставление развития пароходов от Фультона до наших дней:

Название парохода	Год	Регистровый тоннаж брутто $v_{бр}$	Мощность двигателей *л. с.*	Скорость хода в узлах
„Clermont“	1807	150	20	4,5
„Sirius“	1837	700	320	—
„Great Britain“	1843	3 500	1 100	9,25
„Great Eastern“	1857	27 500	8 300	14,0
„Scotia“	1862	3 871	4 200	13
„Britannic“	1874	5 004	6 090	16
„City of Rome“	1881	8 453	11 890	17
„City of Paris“	1889	10 500	18 350	19
„Fürst Bismark“	1891	8 430	16 400	19
„Campania“	1893	12 950	30 000	22
„Deutschland“	1900	16 502	33 000	23,5
„Mauretania“	1907	30 696	70 000	25
„Bremen“	1929	51 656	96 800	27
„Normandie“	1935	75 000	160 000	28
„Queen Mary“	1936	80 773	200 000	30

Двадцатисильному двигателю «Clermont'а» современная техника может противопоставить 200 000 *л. с.* паротурбинной установки «Queen Mary».

Рост мощности в десять тысяч раз — таков количественный итог стотридцатилетнего развития судовой паросиловой установки. Итог, однако, явно преуменьшенный. Главный двигатель «Clermont'а» был и единственным, а на «Queen Mary» можно отметить еще четыре вспомогательных турбины по 1300 *квт* для обслуживания котлов и насосов, 24 дизельных установки спасательных судов и т. д. Еще более преуменьшенным окажется этот итог, если перенести внимание с количественной на качественную сторону вопроса, на рост параметров и показателей работы установок и прежде всего на самое качество новых паровых двигателей.

К 60-м годам XIX в. судовые установки пришли примерно с такими рекордными показателями («Great Eastern» как уникум оставляем в стороне. Показатели в графах таблицы относятся не к одной и той же установке).

Регистровый тоннаж брутто в *т*	Мощность двигателей в *л. с.*	Давление пара в *ати*	Расход угля в *кг* на *л. с./ч*	К. п. д. котла в %	Паронапряжение пов. нагр. котла в *кг/м² ч*
3 000—4 000	2 000—4 000	6,3	4,5—5	55—58	45

На грани XIX и XX вв. капитализм вступает в высшую и последнюю стадию своего развития. Начинается эпоха господства монополий, эпоха величайших противоречий в развитии техники.

Поршневой паровой двигатель уже к концу XIX в. вырастает до огромных мощностей. Получают распространение судовые двигатели с тройным и даже четырехкратным расширением пара. О некоторых наиболее высоких показателях судовых паросиловых установок этого времени можно судить по следующим данным:

Тоннаж регистровый брутто в *т*	Мощность двигателей в *л. с.*	Давление пара в *ати*	Расход угля в *кг* на *л. с./ч*	К. п. д. котла в %	Паронапряж. пов. нагрева котла в *кг/м² ч*
12 000—16 000	16 000—33 000	12—17	0,63—0,85	70—80	48,5—67,5

Начало XX в. ознаменовано вступлением на арену истории новых судовых двигателей — паровой турбины и двигателя внутреннего сгорания. Имена Парсонса и Дизеля стали знаменем новой эпохи в развитии судовых двигателей. На первых порах казалось, что двигатель внутреннего сгорания с его высоким экономическим к. п. д. угрожает самому существованию пара на водном транспорте. Теперь же мы видим, что судовые паросиловые установки не только не сдают своих позиций, но и получили грандиозные формы, не имеющие себе равных для других видов двигателей. Пароход и теплоход продолжают сосуществовать.

Воплотившись в новой конструктивной форме, основанной на ротационном движении, паровой двигатель продолжает играть величайшую роль на водном транспорте. Пятидесятитысячесильные агрегаты новейших судов объединяются в установках, оспаривающих среди теплосиловых установок первенство по экономической рентабельности. Еще более грандиозны перспективы, которые сулит ближайшее будущее в развитии судовых паровых двигателей. Величайшую роль в этих перспективах играют судовые котлы новых форм, революционизирующие технику водного транспорта.

Рекордные показатели, достигнутые судовой теплотехникой к настоящему времени, представляются примерно в следующем виде (в графах показатели не одной и той же установки):

Тоннаж регистровый брутто в *т*	Мощность двигателя в *л. с.*	Давление пара в *ати*	К. п. д. котла	Паронапряжение поверхности нагрева котла в *кг/м² ч*
80 000	200 000	24—130	85—95	85—460

Однако не следует забывать, что как в этом, так и в предшествующих аналогичных местах даны только лишь отдельные штрихи, отнюдь не характеризующие общего уровня технического развития, а всего лишь дающие некоторые наиболее выдающиеся отдельные показатели, достигнутые к определенному времени.

Как ни велики успехи развития судовых двигателей в эпоху господства монополий, это развитие ограничено специфическими противоречиями, неотъемлемыми от капитализма.

В современной технике судовых паросиловых установок явственно видны тенденции, реализация которых в широком масштабе означала бы подлинную техническую революцию в этой отрасли. Это прежде всего применение пара высоких давления и перегрева, а также регенеративного процесса в турбинах.

Повышение давления до 120 *ат* и перегрева до 500° Ц, как показывают опытные и теоретические данные, позволяет увеличить к. п. д. паросиловой установки до 35—37%, т. е. до уровня к. п. д. лучших современных дизельных установок. Специальные конструкции котлов высокого давления, котлы с принудительной циркуляцией (Ла-Монт), экспресс-котел с наддувом и принудительной циркуляцией газов (Велокс), прямоточные котлы Бенсона, Зульцера и другие специальные котлы уже на практике показали чрезвычайно высокие экономические показатели и другие преимущества. Исключительное значение этих котлов подтверждается теоретическими подсчетами выдающихся специалистов и еще более — усиленной закупкой крупнейшими фирмами лицензий на патенты этих котлов. Однако все эти котлы в капиталистических странах не получили широкого применения.

И здесь, как и в других отраслях, прогрессивным тенденциям противостоят тормозящие силы, неотъемлемые от капиталистического способа производства. Это прежде всего боязнь моральной амортизации старых капитальных вложений, резкое сужение в связи с кризисом и последовавшей депрессией особого рода базы для введения новейших усовершенствований.

«Тенденция к застою и загниванию, свойственная монополии, продолжает в свою очередь действовать, и в отдельных отраслях промышленности, в отдельных странах, на известные промежутки времени она берет верх» [1].

Неизбежная при капитализме хроническая недогрузка производственного аппарата приводит в ряде случаев к сознательному разрушению основного капитала. Достаточно вспомнить о размерах тоннажа судов торгового флота, пущенных на слом:

1913 г.	87 700 регистр. *т*	1931 г.	1 018 200 регистр. *т*
1929 „	943 600 „ „	1932 „	1 346 100 „ „
1930 „	848 500 „ „	1933 „	2 413 200 „ „

Особенно обостряясь во время кризисов, тенденция к преждевременному разрушению основного капитала продолжает действовать и в остальное время. Трагическая судьба гиганта XIX в. «Great Eastern», судьба «Mauretania» снова и снова напоминают о недостаточном использовании капитализмом созданных им выдающихся технических творений.

---

[1] В. Ленин. Империализм как высшая стадия капитализма. Соч., т. XIX, стр. 151.

В результате переплетения сложнейших противоречий империализма налицо обострение неравномерности роста производительных сил; недостаточное использование вполне реальных технических возможностей, неравномерность, а зачастую и определенная односторонность в развитии техники. И здесь надо прямо сказать, что судостроение, а стало быть, и строительство судовых механизмов, по темпам развития производства принадлежит к отстающим отраслям. Неравномерность развития отдельных отраслей капиталистического хозяйства и явное отставание судостроения характеризуют следующие данные о размерах мировой продукции капиталистических стран в 1929 г., выраженные в процентах к продукции этих же стран в 1913 г.:

Судостроение	83
Потребление хлопка . . .	111
Добыча угля	116
Выплавка чугуна	126
Выплавка стали	160
Производство азота (сульфатаммония)	286
Добыча нефти	411
Производство алюминия . .	424
Производство автомобилей	892
Производство искусственного шелка	1172

Как видим, в судостроении даже в 1929 г. не был достигнут довоенный уровень размеров производства.

Возможности торможения технического прогресса резко выросли в условиях послевоенного капитализма в связи с ростом самих монополий. Последний сделал возможным вложение монополиями больших сумм на скупку и омертвление патентов. Вместе с тем в руках монополий выросли огромные научно-исследовательские организации, непосредственно внутри которых монополии могут консервировать изобретения еще в момент их рождения (in statu nascendi), сохраняя в глубокой тайне важнейшие технические открытия.

Все эти и аналогичные тенденции, обусловливаемые усилением паразитизма и загнивания капитализма, конечно, сочетаются с техническим прогрессом, ускоряющимся в отдельных отраслях, особенно связанных с военной техникой. Капиталистическая техника, как и «в целом, капитализм неизмеримо быстрее, чем прежде, растет, но этот рост не только становится вообще более неравномерным, но неравномерность проявляется также в частности в загнивании самых сильных капиталом стран (Англия)» [1].

Только в самых общих чертах, отнюдь не исчерпывая даже возможного перечня проблематики, мы этим лишь напомнили о том сложнейшем клубке противоречий монополистического капитализма, который пронизывает техническое развитие в целом и в частности развитие судовых котлов. Этому противостоит в СССР диаметрально противоположное положение, что так блестяще доказывает хотя бы пример работы над прямоточными котлами Л. К. Рамзина.

Конкретно показать на примере развития данной отрасли техники всю сущность содержания, всю специфику технического развития на различных ступенях общественного развития — исключительно слож-

[1] В. Ленин. Т. XIX, стр. 172.

ная и в то же время важная задача. Такой показ динамики технического развития может много помочь воспитанию новых кадров, революционно мыслящих и в технических вопросах. А именно такие кадры, «свободные от консерватизма и застойности», идущие «смело вперед, ломая устаревшие технические нормы и создавая новые, более высокие», кадры, борющиеся со старыми, изжившими себя канонами в технике, — необходимы социалистическому производству и уже выросли в нем в лице застрельщиков великого стахановского движения.

В учебниках по техническим дисциплинам, как правило, доминирует статическое изложение материала, соответствующее положению изучаемой дисциплины на сегодняшний день. История же техники помогает изучать динамику технического развития. Наш опыт преподавания истории техники во втузах показывает, как важно для молодых специалистов усвоить эту динамику, ознакомиться с достижениями и ошибками прошлого, конкретно изучая в исторической перспективе пути движения теоретических и практических знаний в данной отрасли.

Но помимо такой пропедевтической роли, актуальной и для молодых и для старых специалистов, критическое историко-техническое исследование может много помочь и непосредственно развитию данной отрасли техники конкретным вскрытием основных закономерностей и дальнейших путей развития. Нельзя ведь строить перспективный план, не вооружившись знанием предшествовавшего развития и не выводя на основе его анализа дальнейшего направления движения. И, наконец, историко-техническое исследование может оказать и определенную непосредственную практическую помощь при решении конкретных технических задач, извлекая из архивов истории технические идеи и проекты, в свое время не реализованные и ныне получающие право на жизнь, но уже на новом расширенном основании. Достаточно вспомнить хотя бы тот факт, что идея подогрева воздуха, поступающего в топку, была дана Папином, а идея кипящего экономайзера — Севери еще в конце XVII в. Еще более яркий пример — идея прямоточного котла, данная в середине XVIII в. Блекеем, идея, которую в том же веке пытался реализовать Фитч. Именно эта техническая идея XVIII в. оказалась наиболее прогрессивной и актуальной для наших дней практики судового котлостроения.

А ведь сколько еще таких гениальных идей, опередивших свое время и забытых, может быть возрождено непосредственным изучением истории техники. Сколько еще идей, омертвленных спецификой капиталистического производства, может быть извлечено из архивов истории и после критического изучения реализовано на новом основании социалистического производства.

Технический опыт прошлого может и должен быть поставлен на службу развития социалистической техники. Он должен помочь формированию революционных воззрений во всех отраслях техники, помочь воспитанию тех специалистов, которые так необходимы для нашего производства, только в котором возможно подлинно безграничное развитие техники, не знающее никаких противоречий.

История техники в наших условиях призвана оказать свое содействие в формировании нового человека, в вооружении его пониманием техники не в застывших формах, а вечно движущейся, изменяющейся. Ведь, именно, в связи с задачами воспитания специалистов нового профиля, необходимых для социалистического производства, еще в 1929 г. Ноябрьский пленум ЦК ВКП(б) вынес постановление

о введении во втузах преподавания марксистской истории техники.

Создание критической истории техники судовых механизмов — сложнейшая задача, требующая большой предварительной работы. Наследство, доставшееся нам от буржуазных исследователей по истории техники, количественно велико, но очень бедно качественно, не говоря о полной методологической беспомощности буржуазных работ. Налицо огромное количество статей по отдельным вопросам и небольшое количество сводных работ, да и то охватывающих далеко не все развитие техники в целом для данной отрасли (см. библиографические указания в этой книге).

Первоочередную задачу представляют выявление, критическое изучение и систематизация материалов. Работа П. А. Бараш, рассмотревшего развитие судовых котлов, имеет большую ценность прежде всего с этой стороны. Автор в своей работе уделяет преимущественно внимание описанию самих конструкций и результатов испытаний различных типов котлов в исторической последовательности. В работу включена также история развития топок и способов отопления судовых котлов; важнейшие моменты этой линии развития — нефтяное отопление, механические топки, пылеугольное отопление — выделены в особые главы. Развитию котельной арматуры и гарнитуры в работе уделяется внимание далеко не в той мере, в какой эти элементы были связаны с усовершенствованием котлов.

Только иногда автор касается вопросов технологии судового котлостроение и мало внимания уделяет проблеме развития теоретического базиса, связанного с усовершенствованием судовых котлов. В этой работе также далеко недостаточно дана необходимая увязка рассматриваемой отрасли техники с другими отраслями, равно как и социально-экономический анализ трактуемых вопросов. Хорошо ориентируясь в обширной технической литературе по котлам со времени их возникновения, автор сумел удачно подобрать материал, подробно и интересно освещающий рассматриваемые вопросы. Автор иллюстрировал множеством таблиц, фактических справок и рисунков рассмотренные им котлы и дал достаточно глубокий технический анализ отдельных котлов, стремясь увязать между собою отдельные конструкции и пытаясь сопоставить их с предшествующими и последующими, выявляя их недостатки и преимущества.

Удачно отмечая возрождение многих забытых идей судового котлостроения через десятки, а иногда и сотни лет после их высказывания, автор стремится по возможности показать и причины, затормозившие в свое время реализацию этих идей. При выяснении этих причин автор сосредоточивает свое внимание преимущественно на технической стороне вопроса, не задаваясь рассмотрением экономических и социальных причин, омертвлявших реализацию тех или иных идей.

В результате — перед нами книга, которую можно характеризовать, как весьма ценные и хорошо систематизированные данные по истории развития судовых котлов, охватившие около полутораста систем, сыгравших заметную роль в развитии парового водного транспорта. Публикуемая книга представляет обширную сводку материалов, на основе которых возможна дальнейшая исследовательская работа. Неизбежным началом последней всегда должно быть критическое научно-обоснованное первоначальное накопление материалов. Такое накопление представило очень большую сложную работу из-за распыленности и частью недостаточной проработанности литератур-

ных и патентных публикаций, на которых автор в основном построил свою работу, использовав значительное количество печатных источников. Архивные материалы и материалы музеев автору в его работе использовать не удалось.

Несмотря на указанные недостатки, книга П. А. Бараш, мы считаем, сыграет большую роль в деле разработки и критического изучения истории техники данной отрасли.

Инженерно-технические и научные работники наших втузов, исследовательских институтов и промышленности, студенты втузов впервые получают в книге П. А. Бараш возможность проследить в хронологической последовательности полуторавековую историю развития судовых котлов от опытов Фитча и его современников вплоть до прямоточных котлов Рамзина.

Проф. *В. Данилевский*

20 июня 1936 г.
г. Ленинград

ОТ АВТОРА

Данная работа представляет попытку систематизированного изложения развития конструкций судовых паровых котлов со времени их появления до наших дней.

Работа рассчитана на инженерно-технический персонал, научных работников, преподавателей и студентов вузов теплотехнической специальности.

Автор приносит искреннюю благодарность проф. К. А. Стрижу и инженерам-механикам Г. А. Абагянцу, С. В. Иванову и Е. А. Шестопалову, просмотревшим рукопись данной работы и давшим ряд ценных указаний, и выражает сердечную признательность своей жене Л. Д. Розановой, оказавшей большую практическую помощь в работе.

ГЛАВА I

ПЕРВЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

Первые паровые котлы были стационарными. Они послужили базой для разработки первых судовых котлов. Стационарные котлы были тем отправным пунктом, от которого пошло развитие судового котлостроения. Именно на первых стационарных котлах можно проследить появление и первоначальное развитие отдельных элементов котла и его арматуры (пробные краники, водомерные стекла, предохранительные клапаны и т. д.).

1. Первые попытки использовать пар

Идея использования энергии пара для производства какой-либо работы одним из первых описана греческим ученым Героном, жившим, вероятно, за 120 лет до нашей эры [1]. В сочинении Герона, текст которого, хотя и не в оригинале, сохранился до наших дней, приводится описание первого парового котла [2].

Котел Герона состоял из полого цилиндра и трех труб (рис. 1). В цилиндре была сделана вертикальная выгородка. Последняя предназначалась для получения в ней пара, идущего на раздувание горящего топлива.

Устройство котла Герона на приведенном нами рис. 1 отличается от рисунка Кариона лишь тем, что паровая трубка для раздувания горящего угля подведена не сверху котла, как у Кариона, а снизу. Подвод парового дутья под котел показан и у Бека [3].

Паровой котел наполнялся водой вручную через трубку *В*. Для этого голова животного (изображениями которых в то время часто снабжались аппараты) вместе с пародутьевой трубкой поворачивалась и вынималась вверх. В остальной части аппарата производилось кипячение воды. Здесь вода также заливалась в котел вручную через воронку.

---

[1] До сих пор точно время жизни Герона еще не установлено. Так, например, Мейер (R. Meyer) в своем труде „De Heronis aetate“ (Лейпциг, стр. 30, 1905) утверждает, что Герон жил не раньше второй половины II в. до н. э. и не намного позже середины I в. Некоторые же авторы считают, что Герон жил в 200-х гг. н. э. (Hammer-Jensen, N. Jahrb. f. d. kl. Alt. XXV, стр. 224. См. Дильс, Античная техника, перевод и примечания М. Е. Сергеенко и П. П. Забаринского, стр. 56).

[2] Приведенный материал о Героновом котле взят из немецкого перевода работы Герона. Перевод сделан Карионом в 1688 г. (Heronis Alexandrini. Buch von Luft und Kunsten. Frankfurt, 1688).

[3] Теодор Бек. Очерки по истории машиностроения. Т. I, стр. 28, рис. 30, 1933.

Для того чтобы во время кипения вода не выбрасывалась из кот и не гасила огонь, предусмотрена трубка *C*, направляющая выбрас ваемую воду через воронку обратно в котел. Процесс кипячения водь и парообразования происходил в котле за счет тепла от сгоравшего топлива, которое передавалось через стенки труб и полого цилиндра к воде. Отметим, что нижняя труба, соединяющаяся с паровым котлом, имела наперсткообразную форму. Другие же две верхние трубы соединяли противоположные стороны водяного котла Герона.

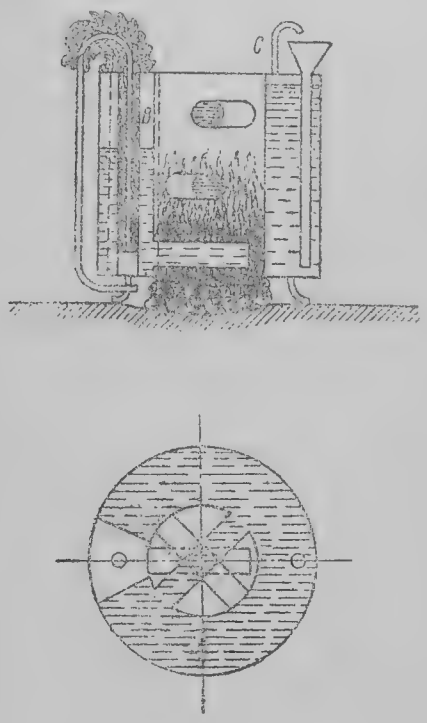


Рис. 1 Котел Герона.

Описанная конструкция котла Герона представляет как бы прообразные существующих котлов наперсткового типа, водотрубных и цилиндрических с жаровыми трубами. Возможно, что эта конструкция оказала некоторое влияние на западно-европейские конструкции XVII—XVIII вв.

Это положение косвенно можно подтвердить и тем, что в XVI и XVII вв. появляются в свет переводы сочинений Герона, а именно в 1575 г. вышел латинский перевод сочинений Герона с добавлениями Алеоти. В 1688 г. впервые был издан Карионом немецкий перевод сочинений Герона.

Со времени Герона и до XVI в. не найдено данных, указывающих на использование энергии пара для производства работы. Однако, пока не проведено специального исследования, нельзя категорически утверждать, что в этот период времени не было никаких попыток применения водяного пара для производства механической работы [1].

В XVI же веке не менее интересные идеи практического применения энергии пара даны Леонардо да Винчи. В своих сочинениях он предлагает применять паровое дутье [2] в плавильных печах, а также дает описание устройства и работы паровой пушки, которая, по мнению Леонардо, была известна еще Архимеду [3] (рис. 2): «Третья часть

[1] Есть сведения, что еще в 250 г. до н. э. греческий врач Филумен применял прибор, подобный Папинову котлу, но, конечно, без всяких предохранительных клапанов (Chemiker-Zeitung, № 123, 1909). В 230 г. до н. э. Филон Византийский описал прибор, в котором пар был использован для раздувания огня на жертвеннике (Philon, Pneumatica, 57, 58). В 553—559 гг. н. э. Антемий из Тралогеса пытался взорвать при помощи пара дом своего соседа Зенона в Константинополе (Agathias. De imperio et rebus gestis Justiniani imperatoris. Liber V. De machinis mirabilibus). В средние века ряд авторов описывал увеселительные приборы, в которых пар использовался для дутья (так называемые «Püstrich»). О таких приборах, которым придавали вид фигур животных, людей и т. д., писали Альберт Великий в XIII в., Киезер (1405 г.) и др. О конструкциях же, в которых пар был бы использован непосредственно для производства механической работы, пока нет достоверных сведений для промежутка времени между деятельностью Герона и XVI в. *(Прим. ред).*

[2] F. M. Feldhaus. Leonardo der Techniker und Erfinder. Стр. 45—46, 1922.

[3] Указанное сочинение, стр. 92—93.

инструмента находится внутри большой массы горящего угля, и, когда она им хорошо нагреется, завинчивают винт, который находится над водяным резервуаром. Когда винт ввинчен вниз, он открывает проход, и, после того как вода вытекла, она течет в нагретую часть инструмента и внезапно превращается в пар, так что, повидимому, происходит чудо — такая видна сила, и слышен шум. Она бросает ядра, весящие один талант, на шесть стадий расстояния» [1].

Разумеется, никакого чуда здесь не было, а ядро выбрасывалось из дула пушки действием энергии пара [2].

В работах Леонардо да Винчи [3] имеются даже рисунки и описание приборов, при помощи которых он опытным путем изучал, во сколько раз объем пара при определенных условиях больше равного по весу объема воды. Далее имеются указания, что еще Леонардо да Винчи дал идею передвижения судов энергией пара и что якобы он дал общие указания об устройстве пароходов [4].

Однако, Фельдхауз очень обстоятельно доказывает неправильность этого утверждения, приводя объяснения рисунков в работе Леонардо

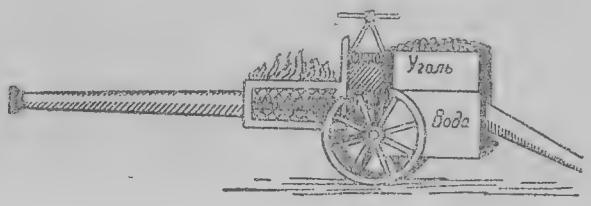


Рис. 2. Паровая пушка.

да Винчи, очевидно неправильно понятых Матчосом. Надо полагать, что Фельдхауз здесь прав.

Также сомнительны сообщения [5] одной испанской рукописи, найденной Навaретом в королевских архивах в Симанке, в которой описано, что 17/VI 1543 г. Бласко де Гарай продемонстрировал перед императором Карлом V работу своего судна «Trincte» (Троица) [6]. По словам Навaрета, посредством этого судна при штиле без весел и парусов из гавани Барселоны были выведены морской корабль и большое транспортное судно [7].

Интересные идеи практического использования энергии пара даны в сочинении француза Соломона Де Ко, описывающего устройство и работу аппарата для подъема воды [8].

[1] Сидоров Л. И. Очерки из истории техники. Т. II, стр. 13—28, 1928.

[2] Хотя Леонардо и говорит об «Архигроме», паровой пушке Архимеда, как о действительно осуществленном изобретении, нет никаких указаний, подтверждающих, что эта пушка была в действительности когда-либо построена. (Леонардо-да-Винчи. Избранные произведения. Стр. 191—192, 1935. *(Прим. ред.)*

[3] F. Feldhaus. Leonardo der Techniker und Erfinder. Стр. 90—91, 1922.

[4] Matschoss C. Die Entwicklung der Dampfmaschine. Berlin, т. I, стр. 68, 1908.

[5] Указанное сочинение, стр. 68—69.

[6] Beck. Geschichte des Eisens. Т. II, стр. 534.

[7] Сообщение Навaрета было опубликовано Цахом в его «Correspondence astronomique» (vol. XIV, № 1, p. 30). Впоследствии Мак-Грегор доказал, что опыты Бласко де Гарая могли быть произведены только с судном с гребными колесами, приводимыми в движение вручную. Society of Arts, 1858. *(Прим. ред.)*.

[8] Solomon de Caus. Les raisons des forces mouvantes avec diverses machines Francfurt a. M. Стр. 4, 1615.

Аппарат (рис. 3) состоял из котла *A* и напорной трубы с краном *B*, опускающейся нижним концом почти до дна котла. Через боковую трубку вода заливалась в шарообразный котел *A*, после чего закрывали краны *D* и *B* и разводили под котлом огонь.

Тепло, выделяемое при сжигании топлива, частично передается воде через стенки котла и превращает часть воды в пар. Когда вода в котле закипала и давление пара превышало гидравлическое сопротивление и вес столба воды в напорной трубке, тогда при открытии крана *B* вода из парового котла била вверх фонтаном. Если соединить трубку с резервуаром, то вода по ней может переливаться в резервуар и таким образом подаваться вверх (рис. 4).

Подъем воды в резервуаре будет продолжаться до тех пор, пока вода в котле не опустится ниже основания трубки, и давление в котле

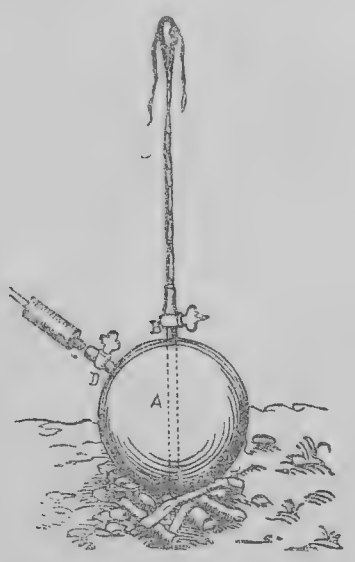


Рис. 3. Аппарат Соломона Де Ко.

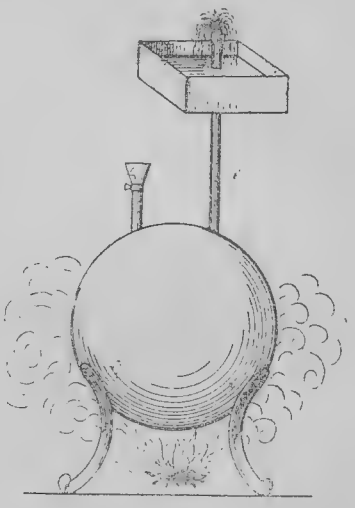


Рис. 4. Аппарат Соломона Де Ко вместе с сосудом.

будет превышать гидравлическое сопротивление в трубке и вес воды в ней. Несколько ранее, чем это произойдет, прекращали огонь, снова заливали воду через боковую трубку в котел, и опять начинался тот же самый процесс.

Установка Де Ко могла бы поднимать воду на весьма большую высоту, при условии надлежащей прочности котла и напорной трубы.

Практического применения этот способ подъема воды не получил[1], главным образом потому, что к. п. д. этой установки был бы крайне мал. Это можно подтвердить следующим примером: при подъеме 1 *кг* воды на высоту 42,7 *м* производилось бы полезной работы 42,7 *кгм* или, в тепловом эквиваленте, 0,1 *кал*; затрачивалось бы на эту работу по крайней мере около 290 *кал*, при условии, что температура поступающей в котел воды будет равна 10° Ц, а к. п. д. котла — 50%.

---

[1] Прежде всего потому, что не было достаточных технических условий для выполнения этого аппарата в размерах, имеющих практическое значение. (*Прим. ред.*).

Таким образом к. п. д. всей установки получился бы равным

$$\eta_{уст} \frac{Q_{пол}}{Q_{затр}} = \frac{0,1}{290} \cdot 100 \simeq 0,035\%.$$

В настоящее время подобные установки работают с к. п. д. равным 20%, т. е. примерно в 600 раз больше к. п. д., который мог получиться в установке Де Ко [1].

2. Прототип активной турбины — двигатель Бранка

Заслуживает внимания проект парового двигателя итальянского математика и инженера Джиованни Бранка. Этот двигатель был по существу прототипом активной турбины [2].

Как видно из рис. 5, паровой котел Бранка оформлен в виде человеческой головы. Идеология феодального общества (вся работа должна быть выполнена руками крепостного) получила выражение даже во внешнем оформлении котла.

Образующийся в котле пар должен был выходить из котла через трубку с большой скоростью и, ударяясь о лопатки колеса, заставлять последнее вращаться. Вращательное движение колеса системой передач превращалось в возвратно-поступательное движение пестов.

Заслуга Бранка заключается в том, что он первый предложил паровой двигатель для приведения в движение рабочих машин. Однако, проект Бранка никогда не был реализован.

Из-за малого перепада давления и небольшой паропроизводительности котла двигатель Бранка имел бы очень маленькую мощность и кроме того работал бы с очень низким к. п. д. [3]. Эти причины послужили тормозом для практического применения идей Бранка, но он получил славу изобретателя, впервые предложившего применение пара для промышленности.

Только к концу XVII в. развитие общественного производства не только создало возможность, но даже потребовало перехода от проектов использования пара для работы двигателей к двигателям, пригодным для эксплоатационного применения.

В этом отношении большая заслуга принадлежит Папину, который впервые в 1680 г. предложил построить котел с предохранительным клапаном.

3. Котел Папина

В 1680 г. в одной брошюре под названием «The new digester» Папин [4] дал описание устройства своего котла. Котел Папина (рис. 6) употреблялся для разваривания костей и был первым котлом, получившим практическое применение.

---

[1] Прибор Соломона Де Ко, стало быть, и не мог иметь практического значения, но он все же сыграл свою роль в деле подготовки работы последующих изобретателей. (*Прим. ред.*).

[2] Branca. Le machine. Padua, 1629.

[3] Но самое главное, конечно, было в том, что уровень техники в то время был так низок, что практически осуществить идею Бранка было невозможно. Вместе с тем самое развитие производства в то время еще не требовало настоятельно создания подобных двигателей. Только в конце XIX в. идея Бранка получила полное развитие в паровых турбинах. (*Прим. ред.*).

[4] Папин был знаменитым физиком и математиком. Он родился в 1647 г. в г. Блуа во Франции, жил в Германии в г. Марбурге, во Франции и в Англии. Умер в 1714 г.

Филиал Центральной ВМБ
КУРСЫ Ускоренной Подготовки Командного Состава
60471

В книге Папина имеется указание, что в его котле поддерживалось давление порядка 80—100 *ат*. Работа котла при таком сверхвысоком для того времени давлении, вероятно, диктовалась необходимостью иметь температуру в котле не ниже 300° Ц, при которой только наступает размягчение костей.

Главным, чему обязана надежная работа котла Папина и всех других котлов, появившихся после него, является изобретение им предохранительного клапана, без которого невозможна была бы работа котлов из-за постоянной опасности взрыва их от чрезмерного повышения давления.

С помощью предохранительного клапана Папин мог:

1) не допускать в своем котле увеличения давления выше установленного для данного котла по условиям его прочности;

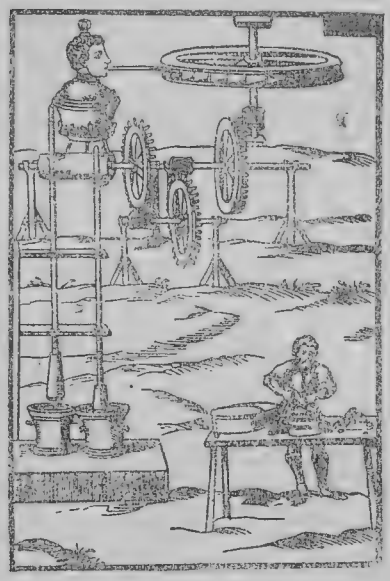


Рис. 5. Двигатель Бранка.

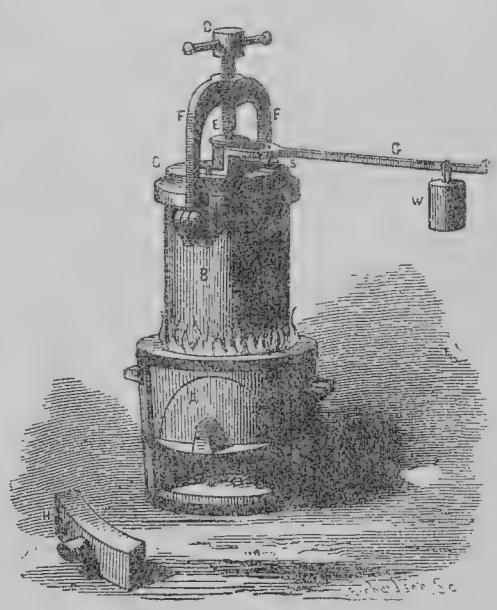


Рис. 6. Котел Папина.

2) сигнализировать сильным шумом выходящего через клапаны пара, что давление в котле поднялось выше нормального;

3) определить во время открытия клапана давление пара в котле.

Конструктивное выполнение (рис. 7) предохранительного клапана сделано Папином так, что упомянутые выше моменты контроля над работой котла могут быть осуществлены лишь при открытии клапана. Последнее же наступает в тот момент, когда начнется существование неравенства:

$$P_к \cdot f > \frac{G \cdot AB}{AC}. \qquad (1)$$

Здесь, как указано в рис. 7, G — груз в *кг*, AB и AC — плечи в *см*, $P_к$ — давление пара в котле в *кг/см²*, f — площадь тарелки в *см²*.

Из неравенства (1) видно, что при постоянных f и AC можно изменением G или AB регулировать давление в котле, при котором наступит открытие клапана, что на практике и делается.

То же неравенство (1) показывает, что открытие клапана будет продолжаться до тех пор, пока не уменьшится $P_к$, так как в момент открытия величины f, AB и AC остаются постоянными.

Принципиальная схема устройства предохранительного клапана была сделана Папином настолько удачно, что она осталась существовать без изменения в рычажных предохранительных клапанах и до наших дней. Установка предохранительного клапана, изобретенного Папином, стала с начала XVIII в. обязательной для всех работающих котлов.

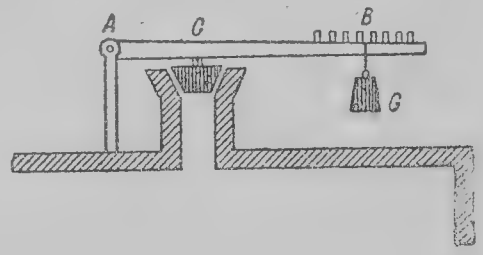


Рис. 7. Предохранительный клапан Папина.

Не менее важное значение для развития теплотехники имеет и вторая идея Папина о подогреве воздуха, необходимого для горения топлива, до поступления его в слой. Эту идею Папин развил при описании изобретенной им топки (1695 г.).

Особенность топки Папина заключается в том, что воздух для горения топлива подводится в слой горючего подогретым и не как обычно — снизу вверх через зольник и решетку, — а наоборот. Воздух поступает сначала в топку, где он, пронизывая пламя, нагревается и под действием естественной тяги проходит слой топлива и частично используется для горения. Оттуда в виде дымовых газов воздух уходит через зольник в газоходы котла.

В измененном виде эта идея Папина получила свое оформление в проекте топки Бурна (Bourne)[1] (рис. 7а). Топка Бурна отличается

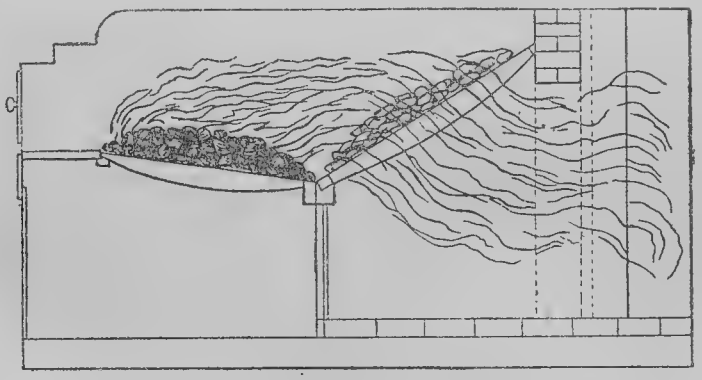


Рис. 7а. Топка Бурна.

от топки Папина лишь тем, что воздух и газы пронизывают не всю решетку, а только один второй ряд колосников.

В настоящее время делаются попытки использовать идею Папина для ускорения подсушки топлива на цепных решетках. Топочные газы и воздух просасываются через зону подсушки топлива (передняя часть решетки).

В качестве топлива Папин рекомендовал применять уголь и дрова, забрасывая их в топку поочередно.

[1] Bourne J. A treatise of the steam engine. Стр. 195, London, 1861

Гениальная идея Папина о подогреве воздуха не была практически им осуществлена, потому что технические возможности того времени не позволяли получить достаточно огнеупорный материал для топки и колосниковой решетки.

Среди других идей Папина особого внимания заслуживает его проект котла с жаровой трубой. Сечение жаровой трубы имело форму квадрата со стороной $a = 254$ *мм*; длина трубы составляла 7 *м*. Благодаря жаровой трубе, Папину удалось повысить обогреваемую газами поверхность нагрева котла на 7 $м^2$, т. е. примерно на 20%. Устройство жаровой трубы в котле Папина диктовалось желанием, при данной паропроизводительности котла, уменьшить его габаритные размеры и придать котлу форму обвода судна (коробчатую). Эти котлы Папин предполагал ставить на суда.

Заканчивая описание изобретений Папина, необходимо еще раз подчеркнуть величайшее значение данных им идей для развития теплотехники. Однако, котлы Папина имели еще очень большой недостаток для эксплоатации: в них, как и во всех предыдущих котлах, отсутствовал контроль за уровнем воды. Упуск воды из котла иногда приводил к взрывам его большой разрушительной силы. Причиной взрыва могло быть понижение прочности стенок котла, оголенных водой, из-за перегрева их от недостаточно интенсивного отвода тепла паром от стенок.

Этот важный недостаток котлов получил лишь частичное разрешение в 1698 г., когда Севери взял патент на паровую машину. Это была первая машина, получившая промышленное значение.

4. Котел и машина Севери

Получив в 1698 г. патент на котел и машину для поднятия воды, Томас Севери в дальнейшем опубликовал описание своей машины в изданной им работе «The Miner's Friend», London, 1702. С 1702 г. Севери начал устанавливать свои машины на рудниках для выкачивания воды из них.

На рис. 8 показана полная установка Севери. Особое внимание обращает на себя устройство в котле водоуказательной трубки с пробным краником. Последняя опускается в котел так, чтобы ее открытый нижний конец был несколько выше верхней границы поверхности нагрева котла, обогреваемой газами.

Такое устройство позволяет контролировать уровень воды в котле открытием пробного краника *G*. Если при открытии краника *G* из водоуказательной трубки пойдет не вода, а пар, это показывает, что уровень воды в котле опустился ниже допустимого предела. При этом возникает угроза перегрева газами до красного каления оголенных водой стенок котла с последующим взрывом его. И, наоборот, если при открытии краника из водоуказательной трубки пойдет вода, то это означает, что уровень ее в котле находится выше нижнего конца трубки. В этом случае возможность взрыва котла от понижения уровня воды исключается.

Отсюда вытекает новое требование к обслуживающему персоналу: питать котел водой таким образом, чтобы в любой момент при открытии пробного краника из водоуказательной трубки выходила вода.

В котлах, работавших при весьма низком давлении (давление в котле не может преодолеть веса столба воды в трубке пробного краника), уровень воды в котле считался нормальным в том случае,

если при открытии пробного краника из водоуказательной трубки не шли ни пар ни вода.

Питание своего котла Севери производил посредством другого вспомогательного котла, в котором поддерживалось давление выше, чем в основном. Питание осуществлялось открытием крана на трубе, соединяющей оба котла, а вспомогательный котел подпитывался насосом.

Способ питания Севери замечателен еще и тем, что в нем впервые предложено предварительно подогревать поступающую в котел воду до температуры кипения во вспомогательном котле. Последний на современном теплотехническом языке можно назвать кипящим экономайзером.

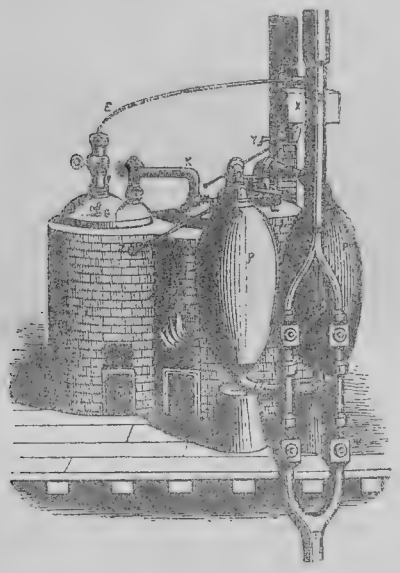


Рис. 8. Котел и машина Севери.

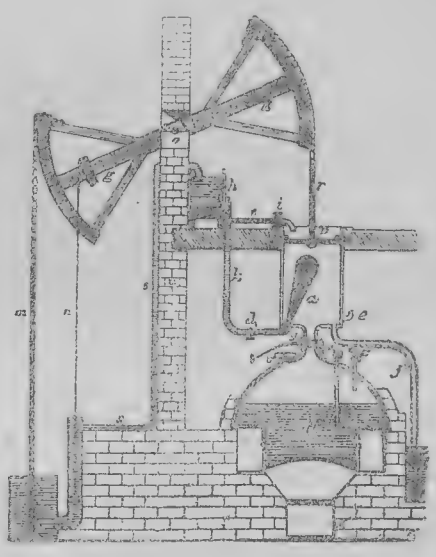


Рис. 9. Котел и машина Ньюкомена.

Заметим, что идея кипящего экономайзера вторично была поднята лишь несколько лет тому назад и полного развития еще до сих пор не получила.

У нас, в СССР, имеется ряд электростанций, например Березниковская, где работают котельные установки с кипящими экономайзерами. Кипящие экономайзеры имеют большие преимущества по сравнению с обыкновенными экономайзерами, так как позволяют сократить общую поверхность нагрева котельной установки.

Блестящая идея Севери может и должна получить полное разрешение в наши дни.

Схема котельной установки Севери отличается от схемы современного котла с водяным экономайзером лишь тем, что последний, как правило, стоит в хвосте котла, тогда как экономайзер Севери имел отдельную топку. К сожалению, Севери в первых своих котлах не применял предохранительного клапана Папина, и поэтому они часто взрывались [1].

Несмотря на значительное усовершенствование котлов и машин Севери по сравнению с предыдущими силовыми установками, эксплоа-

[1] History of Staffordshire. Ч. II, стр. 85, 1801.

тация их все же выявила ряд недостатков: наличие только одного пробного краника, отсутствие прибора, указывающего давление в котле, а самое главное — работа с очень низким к. п. д.

По данным проф. Сидорова[1], на одну индикаторную лошадиную силу в час двигатель Севери расходовал до 80 *кг* угля. Если принять рабочую теплопроизводительность 1 *кг* угля равной 7000 *кал*, тогда к. п. д. паросиловой установки Севери получится равным

$$\eta = \frac{632 \cdot 100}{7000 \cdot 80} \leqq 0{,}1\%.$$

Над повышением к. п. д. силовой установки Севери и устранением отмеченных выше недостатков котла работали многие изобретатели.

В результате этой работы в 1707 г. кузнецом и продавцом железа Ньюкоменом из Дармута (Англия) вместе с мастером свинцовых дел Каулеем и капитаном Севери был взят патент на атмосферную паровую машину и котел.

5. Котел и машина Ньюкомена

Машина Ньюкомена (рис. 9) была названа атмосферной, потому что ее поршень, поднятый вверх упругостью пара, опускался под действием атмосферного давления после образования под поршнем разрежения. Только при этом движении поршня вниз под давлением атмосферы машина давала полезную работу. Движение поршня вверх было холостым ходом. Разрежение в цилиндре создавалось путем впрыскивания в паровое пространство цилиндра струи воды.

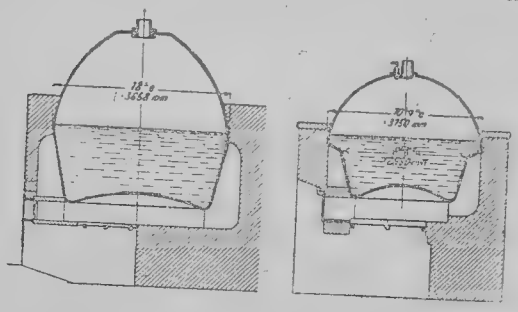


Рис. 10. Котлы для атмосферных машин.

При эксплоатации машины часто наблюдались сильные гидравлические удары в ее цилиндре, иногда сопровождаемые поломкой машины. Причиной этих ударов был унос паром большого количества воды. Унос мог иметь место при очень усиленном перепитывании котла водой.

Для устранения этого недостатка в котле Ньюкомена было решено поставить не одну, а две водоуказательных трубки с пробными кранниками *cc* так, чтобы открытием одного краника можно было проверять наинизший уровень воды, а открытием другого — наивысший.

При нормальном уровне воды в котле в любой момент открытия краника длинной водоуказательной трубки из нее не должны выходить ни пар ни вода, а при открытии краника короткой трубки должен выходить только пар. В ньюкоменовских котлах давление пара не могло преодолеть веса воды в водоуказательной трубке.

Почти все котлы у атмосферных машин по внешнему виду напоминали собой бочку громадных размеров (рис. 10).

В качестве материала для постройки этих котлов применялась медь. Железо и сталь для котлостроения еще не употреблялись, главным образом, потому, что в то время технические средства заводов

[1] Сидоров, Описательный курс паровых машин. Стр. 95, 1925.

не позволяли строить котлы бочкообразной формы из железных и стальных листов.

Позже, когда чугунолитейные заводы освоили производство больших чугунных отливок высокого качества, начали строить котлы из чугунного литья. Как пример, приводим рис. 11 чугунного котла Смитона.

6. Котел Смитона

На рис. 11, 11а показаны котлы Смитона[1], смонтированные им для машины Кронштадтского порта в 1777 г. Каждый котел состоял из трех чугунных поясов, днища и крышки. Отдельные части котла скреплялись между собой на фланцах. Последние располагались не снаружи корпуса, а в водяном пространстве котла. Это делалось для защиты фланцев от действия пламени. Габаритные размеры котла: высота 5100 *мм*, верхний диаметр 3130 *мм*, нижний — 2514 *мм*.

Перед разводкой в каждый котел заливалось 19,5 *т* воды. Когда вода в котле закипала, ее количество уменьшали до 14 *т*. Заполнение котлов и расходного бака питательной водой производилось в то время вручную. Воду наливали 20 рабочих в течение трех суток.

Для наблюдения за уровнем воды котел снабжался двумя медными водоуказательными трубками с пробными кранами. Диаметр трубок равнялся 45 *мм*. Водоуказательные трубки крепились в верхней крышке котла. Одна трубка имела длину от крышки 2489 *мм*, а вторая — 2388 *мм*. Расстояние между нижними концами трубок составляло 100 *мм*. В этих пределах (100 *мм*) должен был колебаться и уровень воды в котле. Интересно заметить, что и в современных котлах наибольшее колебание уровня воды в котле допускают также равным примерно 100 *мм*.

Контроль за уровнем воды в котле осуществлялся таким образом при нормальном уровне воды: во время открытия пробного краника длинной водоуказательной трубки из нее не должны были выходить ни пар ни вода, так как давление в котле было меньше 0,2 *ати* (2 *м* вод. ст.).

Если открывали пробный краник короткой водоуказательной трубки и из нее выходила пароводяная смесь, то это указывало, что вода в котле была ниже наивысшего уровня. Количество воды в котле считалось малым, если при открытии пробных кранков из обеих трубок шла пароводяная смесь, и, наоборот, котел считался перепитанным, если при открытии пробных кранков из обеих трубок не выходили ни пар ни вода.

В котле была предусмотрена возможность устранения течи в днище котла, для чего по специальной трубе на дно котла забрасывались навоз и опилки железные и деревянные.

Кронштадтская машина Смитона могла развивать максимальную мощность 70—80 *л. с.* В среднем за 231,5 часа машина развивала мощность 56,5 *л. с.*

Вес металлических частей всей установки (котлы и машины) составлял 111 *т*, а вес только стенок котла был равен примерно 55 *т*. Таким образом вес котлов на 1 *л. с.* равнялся приблизительно 1000 *кг*, а вес всей установки на 1 *л. с.* — около 2000 *кг*. Эти цифры были безусловно большими, если сравнить их с весом паросиловой уста-

---

[1] П. П. Забаринский. Первые «огневые» машины в Кронштадтском порту. 1936.

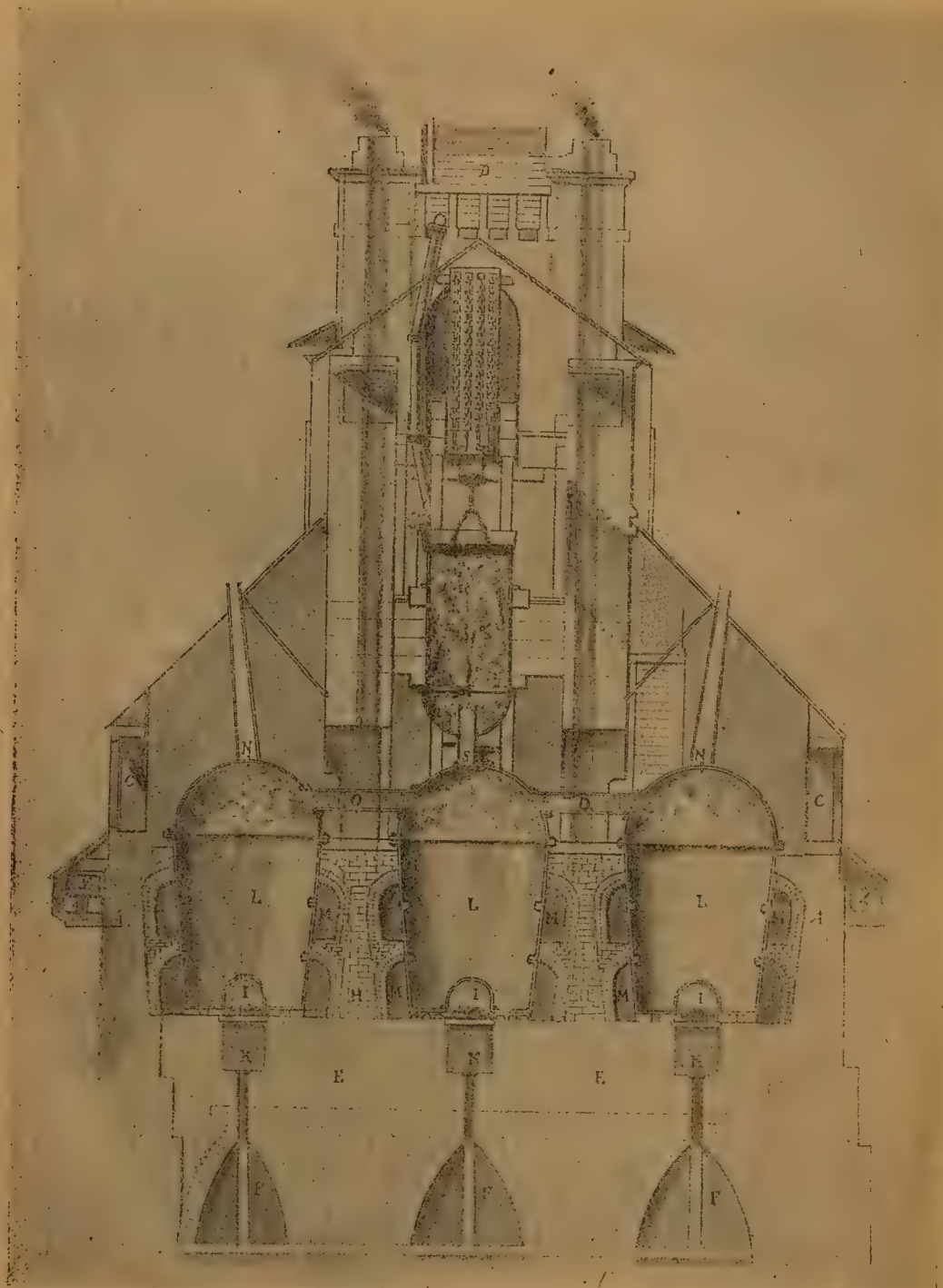


Рис. 11. Котлы и машина Смитона.

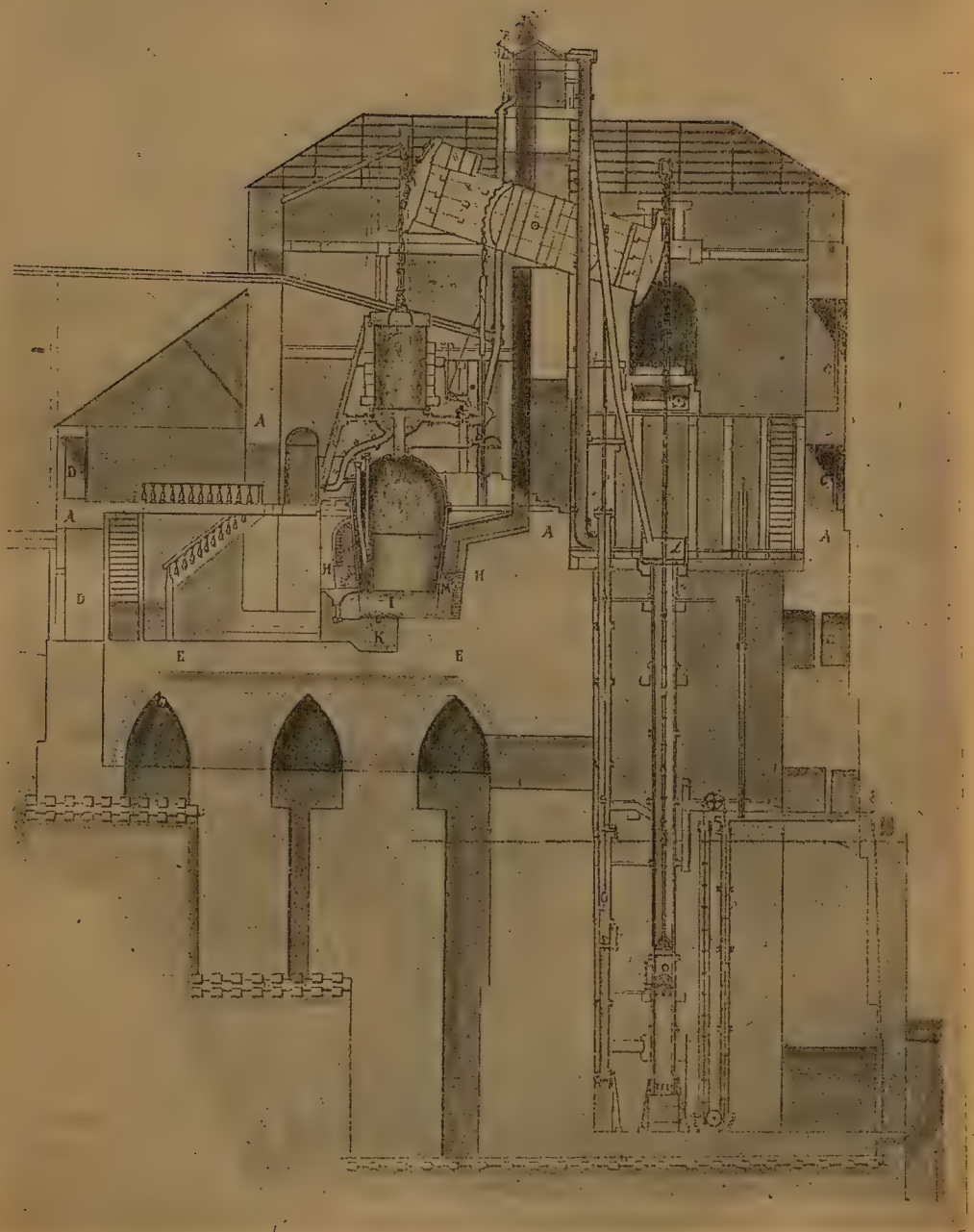


Рис. 11а. Котлы и машина Смитона.

новки современных военных кораблей, где на 1 *л. с.* приходится около 10 *кг*.

Для повышения к. п. д. в кронштадтской машине Смитона был предусмотрен впуск в котел теплого конденсата вместе с подогретой водой, которая периодически впрыскивалась в паровой цилиндр для создания там вакуума. Одновременно Смитон впервые применил изоляцию стенок парового цилиндра.

Нижеприводимые цифры показывают, какой большой скачок в уменьшении расхода топлива на лошадиную силу-час достиг Смитон. За 231,5 часа работы под котлами кронштадтской машины было сожжено около 122 000 *кг* ньюкастльского угля. Если же прибавить к этому еще 30 000 *кг* угля, израсходованного за 57 часов разводки котла, тогда общий расход угля составит 152 000 *кг*. За это время машина выкачала из Кронштадтского бассейна (дока) 177 000 $м^3$ воды, подняв ее на высоту около 20 *м*, т. е. на 1 *л. с. ч* расходовалось около 9,5—11,5 *кг* угля. Многие первые ньюкоменовские машины расходовали около 25 *кг* на 1 *л. с. ч*.

В отношении расхода угля машина Смитона была большим шагом вперед в сравнении с первыми ньюкоменовскими машинами, являясь одновременно самой мощной машиной в мире.

7. Основные причины появления универсального двигателя Уатта

Машины Ньюкомена получили очень широкое распространение только на рудниках и водопроводных станциях, так как они могли применяться лишь для выкачивания воды. С этой задачей машины Ньюкомена, имея возвратно-поступательное движение, справлялись неплохо.

На фабриках и заводах, которые в то время быстро вырастали, ни одна паровая машина еще не применялась. Для фабрично-заводского производства была необходима машина, в которой бы возвратно-поступательное движение поршня превращалось во вращательное движение коренного вала. Хотя шатунные механизмы для этой цели уже существовали, но к паровым машинам впервые успешно применили их в 80-х гг. XVIII в.

Широкое распространение во всех отраслях производства паровые двигатели получили лишь со времени изобретения и введения в эксплоатацию универсальной паровой машины Уатта с вращательным механизмом.

Однако, не надо думать, что применение паровых двигателей Папина, Севери и Ньюкомена вытеснило на этот период употребление водяного и ветряного двигателей. Они попрежнему имели широкое распространение и к этому времени достигли по своим габаритам и весу колоссальных размеров.

Наряду с ними продолжали применять машины, приводимые в движение силой человека и животных. Так, например, некоторые ступальные колеса приводили в движение около 50 человек [1], а на отдельных рудниках для подъема воды и грузов часто работало до 500 лошадей [2].

В рудниках в Гарце были установлены водяные двигатели, диаметр колес у которых равнялся примерно 10 *м*, [3] а на пороге XIX в. у некоторых водяных двигателей вес только одного колеса, выпол-

[1] В. Данилевский. Очерки по истории техники. Стр. 78.
[2] Thurston. Die Dampfmaschine. T. I, стр. 37.
[3] Beck. Geschichte des Eisens. Bd. III, S. 1089.

ненного из чугуна, составлял около 100 *т*. И все-таки мощность таких больших по величине и по весу двигателей была значительно меньше требуемой.

К концу XVIII в. старый энергетический базис (сила человека и животных, водяные и ветряные двигатели) не только не способствовал, но даже задерживал дальнейшее развитие производительных сил общества.

Крупной капиталистической промышленности, бурно развивавшейся в то время, нужен был двигатель, который бы давал:

1) возможность повышения мощности до требуемой величины;

2) возможность производства работы повсеместно и в необходимых количествах;

3) независимость производства энергии от времени и погоды;

4) возможность применения его в любых отраслях производства с быстрой, удобной и надежной регулировкой нагрузки;

5) возможность постройки с наименьшей затратой капитала и с наименьшим весом и габаритными размерами.

Разумеется, ни ветряные ни водяные двигатели, а тем более мускульная сила человека и животных не могли удовлетворить всем этим требованиям, выдвинутым развитием новой капиталистической промышленности.

Двигатель, удовлетворяющий данному социальному заказу капиталистического производства, был создан в 80-х гг. XVIII в., когда развитие металлообработки и других отраслей производства, а также богатый опыт эксплоатации и постройки атмосферных машин и паровых котлов дали возможность Уатту создать наиболее надежную в работе паровую машину.

Значение уаттовской машины как нового универсального двигателя исчерпывающе дано Марксом.

«Только с изобретением второй машины Уатта, так называемой паровой машины двойного действия, был найден первый мотор, который, потребляя уголь и воду, сам производит двигательную силу, и действия которого находятся всецело под контролем человека. Двигатель и сам средство передвижения; он позволяет концентрировать производство в городах вместо того, чтобы рассеивать его в деревне. Наконец, он универсален по своему техническому применению и сравнительно мало зависит в своем местопребывании от тех или иных локальных условий. Великий гений Уатта обнаруживается в том, что патент, взятый им в апреле 1784 г., давая описание паровой машины, изображает ее не как изобретение лишь для особых целей, но как универсальный двигатель крупной промышленности. Он упоминает здесь о применениях, из которых некоторые, как, например, паровой молот, введены лишь более чем через полвека. Однако он сомневался в применимости паровой машины к морскому судоходству. Его преемники, Болтон и Уатт, выставили на лондонской промышленной выставке в 1851 г. колоссальнейшую паровую машину для океанических пароходов»[1].

Уаттовская машина, как и всякое другое изобретение, была подготовлена всем предыдущим развитием техники и науки.

В 80-х гг. XVII в. Папину не удалось бы получить в своем котле рабочего давления пара до 100 *ат*, если бы заводы не освоили производства высококачественных чугунных отливок и не смогли бы сделать тщательной обработки котла Папина.

---

[1] Маркс. Капитал. Т. I, стр. 285, 1932.

Так и машина Уатта была подготовлена появлением всех предыдущих двигателей и создана с учетом их недостатков и преимуществ, притом на более высокой технической базе.

О том, как Уатт использовал для своей машины богатый опыт прошлого, очень хорошо рассказывает он сам в своей автобиографии [1].

В 1763—1764 гг. Уатту пришлось починять модель паровой машины Ньюкомена, принадлежавшей Глазговскому университету. Исправляя модель, Уатт производил тщательные наблюдения над ее работой и только, учтя все недостатки машины Ньюкомена, он приступил к созданию своей паровой машины. Для изобретения последней Уатт использовал также основные знания того времени по физике, механике и математике. Изучение Уаттом физико-математических наук было облегчено тем, что он в течение нескольких лет работал инструментальным мастером в Глазговском университете, где имел возможность общения с такими выдающимися исследователями, как, например, Блек, открывший скрытую теплоту парообразования. За это время Уаттом были изучены классические труды: Desaguliers, Cours de physique expérimentale, 1751; M. Belidor, Architecture hydraulique, 1739; Leopold J. Theatrum machinarum generale, 1724.

Своими физико-математическими познаниями молодому механику удалось обратить на себя внимание, а позднее и стать лучшим другом профессоров университета Симпсона, Адама Смита и Блека.

Изучение и введение в эксплоатацию паровых двигателей как Уатта, так и других изобретателей, в свою очередь значительно расширило область знаний по физике и механике.

Паровой двигатель дал толчок к возникновению новой науки — термодинамики, что подтверждается не только содержанием, но даже заголовком работы основоположника термодинамики Сади Карно. Работа Карно вышла в свет в 1824 г. под названием «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». Введение в эксплоатацию паровых машин и котлов вызывало необходимость и изучения машиностроительных материалов, главным образом их прочности при различных условиях работы.

Применение паровых двигателей и машин позволило капиталистам в несколько раз увеличить производство товаров при одновременном повышении прибылей и сокращении, особенно в текстильном производстве, десятков тысяч рабочих.

«В своих показаниях перед комиссией, на которую было возложено обследование трэд-юнионов, Несмит (Nasmyth), изобретатель парового молота, делает следующее сообщение о тех усовершенствованиях в машинах, которые он ввел вследствие большой и продолжительной стачки машиностроительных рабочих в 1851 г.: «Характерная черта наших современных механических усовершенствований — введение самодействующих рабочих машин. Теперь механическому рабочему приходится не самому работать, а лишь наблюдать за прекрасной работой машины, что доступно всякому подростку... Благодаря этим новым механическим вспомогательным средствам я сократил число взрослых мужчин с 1500 до 750. Следствием было значительное увеличение моей прибыли» [2].

Вся Европа, начиная с XVII и до начала XIX в., переживала возму-

---

[1] А. А. Радциг. Джемс Уатт и изобретение паровой машины. Стр. 31—41, 1924.

[2] Маркс. Капитал. Т. I, стр. 335, 1931.

щение рабочих против машин и двигателей. В начале XIX в. в Англии даже было массовое движение «луддитов», которое ставило целью повсеместное разрушение станков и машин.

8. Котлы и машины Уатта

5 января 1769 г. Уатт взял свой первый патент на паровую машину. Эксплоатационные и опытные наблюдения над работой машины Уатта выявили целый ряд недостатков, устранения которых Уатт добился к 1784 г., создав машину двойного действия. С этого времени его машина получает очень широкое применение на фабриках и заводах для привода во вращательное движение машин и станков.

Но Уатту принадлежат замечательные изобретения не только по машинам, но и по котлам. На рис. 12 показан котел Уатта. Корпус этого котла состоит из металлического сосуда сундучной формы,

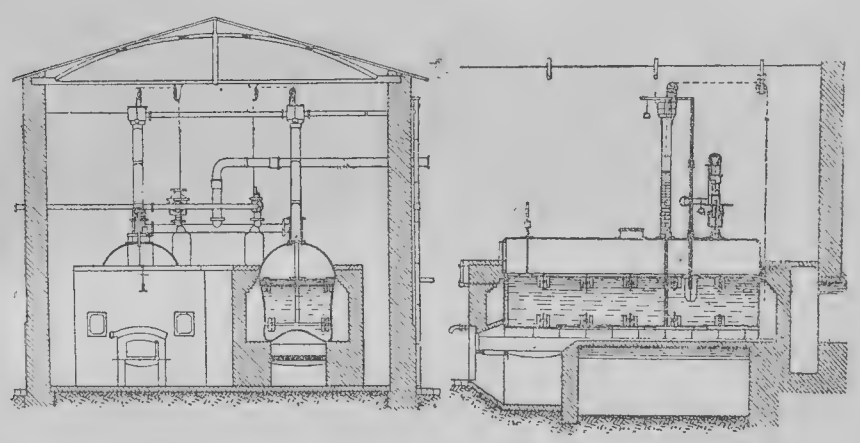


Рис. 12. Котел Уатта.

который немного больше, чем наполовину, заполняется водой. Под передней частью корпуса котла расположена колосниковая решетка, где происходит сгорание топлива.

Горячие газы, образовавшиеся при сгорании топлива, омывают сначала нижнюю часть котла, потом боковые стенки и, наконец, уходят в дымовую трубу.

Поверхность стенок котла, которая с одной стороны омывается газами, а с другой стороны — водой с температурой, близкой к кипению, называется поверхностью нагрева котла. Ту часть поверхности нагрева, которая воспринимает тепло, главным образом, за счет излучения пламени и газов, принято называть радиационной поверхностью нагрева.

Поверхность же нагрева котла, воспринимающая тепло в основном за счет соприкосновения с газами, называется конвекционной поверхностью нагрева.

Над водяным пространством действующего котла находится пар, который непрерывно выходит из толщи воды через ее поверхность, называемую зеркалом испарения.

Пространства, заполняемые паром и водой, соответственно называются паровым и водяным пространствами.

Из приборов, устанавливаемых на котле, Уаттом изобретены водомерное стекло и U-образный манометр.

С помощью водомерного стекла представлялась возможность непрерывно наблюдать за уровнем воды в котле и знать его совершенно точно, а не в пределах расстояния между нижними концами водоуказательных трубок, как это делалось в котлах Ньюкомена.

На рис. 13 показано водомерное стекло Уатта.

Краники *rr* служат для соединения стекла с водяным и паровым пространством котла, а для продувания стекла на случай его засорения служат те же краники *rr* и кран *s*.

В 80-х гг. XVIII в. Уатт изобрел и U-образный ртутный манометр низкого давления (рис. 14). Манометр этот состоял из U-образной металлической трубки, в которой примерно наполовину ее заливалась ртуть. Один конец трубки соединялся с паровым пространством котла, а на поверхности ртути другого конца трубки плавал поплавок с деревянным указателем. При соединении парового пространства холодного котла с атмосферой уровень ртути в обоих коленах трубки был одинаков, и указатель *p* своим верхним концом стоял на нуле масштабной манометрической линейки *m*.

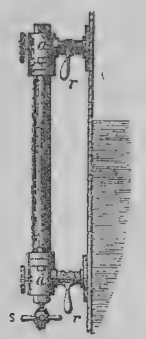


Рис. 13. Водомерное стекло Уатта

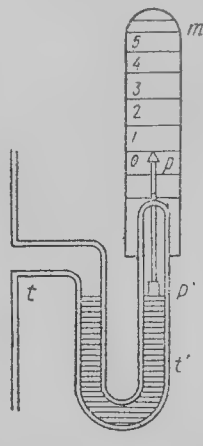


Рис. 14. Манометр Уатта.

Если же в котле было давление, тогда ртуть подымала указатель, который показывал на масштабной линейке число, равное весу столбика ртути, высота которого равна разности уровней ртути в обоих коленах. Практически, при одинаковом сечении колен U-образного манометра, это будет двойная высота подъема указателя от нуля.

На рис. 15 показан паровой котел, который выпускался заводом Уатта и Болтона с конца XVIII в. до 40-х гг. XIX в. Часть приборов, установленных на котле, изобретена другими механиками.

Среди всех приборов особое внимание заслуживает регулятор: 1) питания воды и 2) давления пара в котле (рис. 15).

Последний устроен так, что при сильном повышении давления пара вода в трубке приподнимет полый чугунный поплавок *g* и системой передач прикроет дымовую заслонку, подвешенную на цепи *n' n'*, отчего интенсивность горения уменьшится и вызовет уменьшение давления пара. Тогда вода в трубке снова опустится и заставит приоткрыться дымовую заслонку и т. д.

Устройство автоматического регулятора питания котла поплавкового типа видно на рис. 15. На верху трубы *a'* имеется небольшой резервуар, содержащий теплую воду. На дне этого резервуара находится клапан *r*, который открывается или закрывается усилием поплавка *c*, соединенного с клапаном штангой *xx* через рычаг *xf'*.

При понижении уровня воды в котле поплавок опустится. Поступление воды из резервуара в котел будет продолжаться до тех пор, пока уровень ее в котле не поднимется до высшего предела. В это время питательный клапан прикроется действием поплавка *c*.

При остановке котла пар в нем конденсируется, образуя разреже-

ние. Для того чтобы атмосферное давление, равное приблизительно 10 *т* на 1 *кв. м* не раздавило корпуса котла, Уатт предусмотрел постановку воздушного клапана *ab* (рис. 15а). Последний служил для впуска воздуха в паровое пространство котла после остановки машины на продолжительное время. Впуск воздуха производился автоматически.

Для более полного представления о габаритных размерах котлов Уатта небезынтересно при-

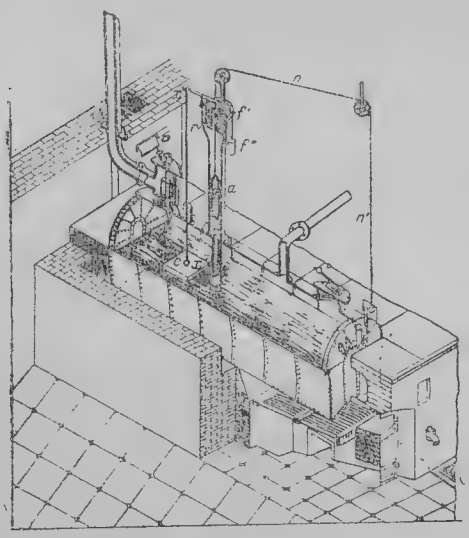


Рис. 15. Паровой котел Уатта.

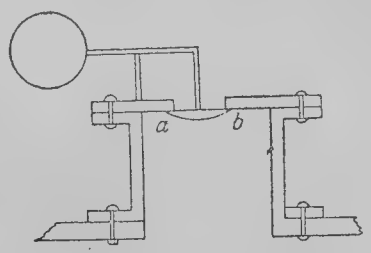


Рис. 15а. Воздушный клапан Уатта.

вести несколько схем. На рис. 16 показана форма котлов Уатта. Котлы строились для давления пара, равного 0,11—0,21 *ати*. Надо сказать, что в то время давление пара 0,3 *ати* считалось уже высоким. Небольшие давления пара в котлах и машинах Уатта в основном объясняются слабой техникой постройки котлов в то время. Последние выполнялись из медных или железных кованых листов небольших размеров. Построенный в 1800 г. сундучный котел Уатта состоял из 250 листов железа. Самый большой из них имел площадь 0,7 $м^2$. Листы были неравномерны по толщине. Дыры для котельных швов не сверлились, а пробивались пробойником. Выполненные примитивным способом котельные швы давали течи даже при небольшом повышении давления пара в котле.

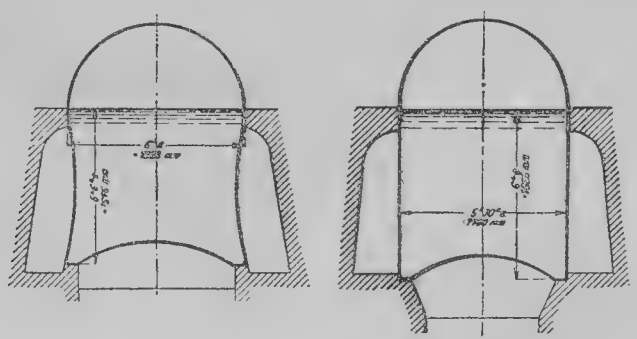


Рис. 16. Формы котлов Уатта.

Примерно с 1804 г. для повышения паропроизводительности котла начали увеличивать поверхность нагрева за счет дымогарной трубы, которая вначале делалась квадратного сечения, а потом овального

(рис. 17). Когда было установлено, что постановка в водяное пространство уаттовских котлов дымогарной трубы значительно повысила их паропроизводительность, то другие котлостроительные заводы начали устанавливать не одну дымогарную трубу, а несколько, причем, как и раньше, газы омывали внутреннюю поверхность труб, а вода — наружную. Такие котлы получили название котлов с дымогарными трубами или огнетрубных.

Основными преимуществами котла Уатта можно считать следующие:

Уаттовские котлы имеют большие водяные пространства, вследствие чего аккумулирующая способность их весьма велика. Это позво-

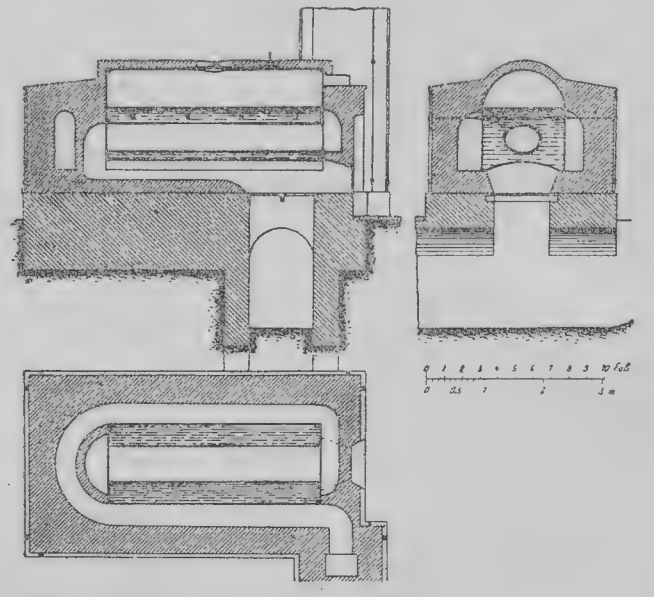


Рис. 17. Котел 1804 г. с жаровой трубой.

ляет при незначительных колебаниях давления пара в них очень сильно изменять паропроизводительность котла за короткий промежуток времени.

Допустим, мы имеем паровой котел Уатта с поверхностью нагрева 40 $м^2$ и водяным пространством в 20 $м^3$. Давление пара в котле изменилось с 1,23 до 1,13 *ата*, причем до изменения давления пара вся вода в котле имела температуру кипения.

Тогда при заданных условиях в котле освобождается

$$D\ (q_1 — q_2) = 20\,000\ (105 — 102{,}5) = 50\,000\ кал.$$

Здесь D — вес воды в котле, выраженный в *кг*, q_1 и q_2 — теплота жидкости до и после изменения давления.

За счет освобожденного таким образом тепла в течение только минуты может испариться сверх нормальной паропроизводительности

$$\frac{50\,000}{536} = 95\ кг\ пара.$$

Если допустить, что с каждого $м^2$ снималось по 10 *кг* пара, то минутная паропроизводительность котла составляла всего лишь

6,67 *кг/мин*. Стало быть, если вода имеет температуру кипения, то при изменении давления пара с 1,23 *ата* до 1,13 *ата* в течение одной минуты нормальная производительность котла может увеличиться за счет освобождаемой при этом теплоты жидкости приблизительно в 14 раз $\left(\frac{95}{6{,}67}\right)$.

Вторым существенным преимуществом котлов Уатта является небольшой унос воды паром. В результате влажность вырабатываемого пара получается невысокой. Это объясняется тем, что зеркало испарения ввиду его больших размеров выдает в час с 1 $м^2$ только 20 *кг* пара против приблизительно 1500 *кг* пара, получаемых у современных судовых котлов.

Эксплоатационные наблюдения также показали, что уаттовские котлы неприхотливы к питательной воде, т. е. могут питаться даже относительно грязной водой.

Кроме того выгодной особенностью котлов Уатта является доступность и простота внутренней очистки от накипи и грязи, а также несложный и недорогой ремонт.

Благодаря перечисленным здесь преимуществам котлы Уатта были в большом ходу в Америке и в Европе до половины XIX в.

Однако, рассматриваемые котлы имели и много недостатков. Главные из них:

1. Небольшая часовая паропроизводительность котла (приблизительно 500 *кг/ч*), т. е. примерно в 400 раз меньше паропроизводительности больших современных котлов, большие габаритные размеры и большой вес котла с водой. Так, например, вес только воды в котле на 1 *т* производимого в час пара составлял около 40 000 *кг*, приблизительно в 60 раз больше полного веса у современных судовых водотрубных котлов.

2. Примерно такие же соотношения получаются и при сравнении габаритных размеров котлов.

3. Наконец, самым важным недостатком такого котла является большое разрушительное действие при его взрывах, часто сопровождающихся гибелью судов и человеческими жертвами.

Котел Уатта по своей принципиальной схеме напоминает современный паровой котел.

Появление надежно работающего и довольно сложного для того времени котла Уатта было возможно только благодаря колоссальному прогрессу техники и культуры и изучению опыта постройки и эксплоатации ранее существующих паровых котлов.

Из всех приборов, установленных на котле, Уаттом изобретены лишь манометр и водомерное стекло.

Остальные приборы по мере развития конструкции паровых котлов введены в процессе опытных и эксплоатационных наблюдений за работой их.

Медленное последовательное снабжение котла указанными приборами в каждом отдельном случае приводило к уменьшению недостатков котла и увеличению надежности его работы.

Таким же образом в процессе опытных и эксплоатационных наблюдений выдвигались все новые и новые требования к постройке и эксплоатации котлов, а именно:

1) обязательное снабжение котла предохранительным клапаном и содержание его в постоянной исправности;

2) снабжение котла пробными кранниками для периодического контроля уровня воды в котле;

3) обязательная установка на котле водомерных стекол для непрерывного наблюдения за уровнем воды в котле. Стекла периодически должны были продуваться;

4) немедленное прекращение питания котла и огня в топке в случае упуска воды из стекла. Это делается для избежания взрыва котла;

5) снабжение каждого котла содержащимся в полной исправности манометром. Контроль давления пара в котле по манометру должен производиться непрерывно.

Усовершенствование котла и машин Уатта позволило ему еще в 1778 г. уменьшить расход угля на лошадиную силу-час до 3,3 *кг* против силовых установок Ньюкомена, которые расходовали около 25 *кг*. В целях распространения своих двигателей Уатт устанавливал силовые установки на заводах и фабриках за свой счет и по договору с предпринимателями получал лишь 1/3 стоимости сэкономленного топлива в сравнении с машинами Ньюкомена.

Котлы Уатта и других его современников имели тот существенный недостаток, что они изготовлялись главным образом из красной меди, являвшейся тогда редким металлом. Поэтому стоимость таких котлов была очень высока.

Для удешевления стоимости котлов некоторые инженеры предложили применить для постройки их весьма распространенный и дешевый строительный материал: камень и сосновое дерево.

9. Каменные и деревянные котлы

Имеются указания, что известный английский инженер Бандли (Bundley) в 1756 г. построил каменный котел с железной жаровой трубой, проходящей через его водяное пространство.[1]

Места прохода трубы через кладку котла для уплотнения замазывались свинцовой замазкой, приготовленной на вареном льняном масле.

Постройка деревянных паровых котлов для нашего сегодняшнего представления о котельной технике может считаться почти анекдотом, однако это факт. Родиной деревянных котлов является Америка, где они строились не так редко. В качестве примера можно указать, что деревянные котлы, показанные на рис. 18, работали на водокачке в Филадельфии в 1801—1812 гг. Котлы эти делались из хороших сосновых досок. Снаружи корпус котла связывался железными обручами. Топка и газоходы котла выполнялись из чугунного литья и располагались в его водяном пространстве. Давление в котле можно было поддерживать не выше 0,2 *ати*, в противном случае в соединениях котла появлялась течь.

Основными преимуществами деревянных котлов являются распространенность и дешевизна строительных материалов (сосна), а главное сведение к минимуму тепловых потерь котла в окружающую среду, так как дерево является прекрасным изоляционным материалом.

Заметим, что встречались котлы и с наружной топкой. В этом случае деревянные стенки котла, омываемые пламенем, покрывались железными листами[2]. Нет необходимости доказывать очевидную нерациональность устройства котла с наружной топкой, хотя бы потому,

---

[1] Gilberts. Annalen der Physik. T. 23, стр. 91.

[2] Matschoss. Die Entwicklung der Dampfmaschine. T. I, стр. 603—604, Berlin, 1908.

что при одинаковой толщине теплопроводность деревянной стенки котла примерно в 200 раз меньше теплопроводности меди, которая тогда часто применялась в качестве строительного котельного материала.

В 1848 г. издана книга Карелина «О паровых машинах», в которой описано устройство деревянных котлов. Автор этой книги усиленно доказывает выгодность применения деревянных котлов в сельскохозяйственных районах России. Работа Карелина указывает на громадную техническую отсталость царской России в сравнении с передовыми промышленными странами.

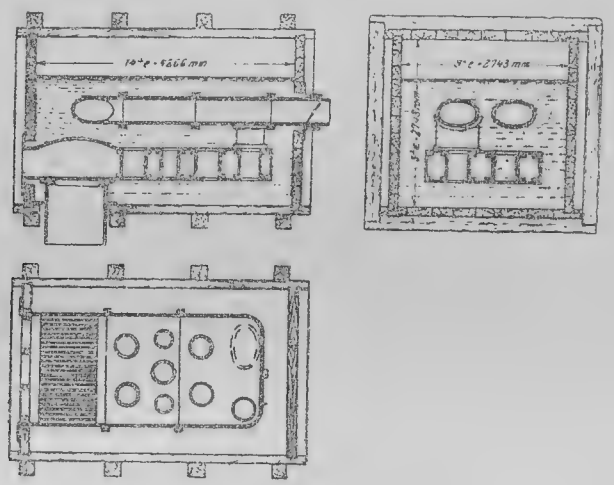


Рис. 18. Деревянный котел.

Однако, ни в одной стране деревянные котлы не получили широкого распространения, потому что они были опасны в пожарном отношении и еще более потому, что они вообще были мало надежны в эксплоатации и совсем не способны выдерживать давление пара более 0,2 *ат*.

10. Котлы высокого давления Эвенса и Тривитика

До конца XVIII в. применялись котлы и машины низкого давления. Основными недостатками такого рода паровых машин были большие габаритные размеры и большой вес их. Применение громоздких и тяжелых машин для передвижения судна или поезда практически было невозможно, а между тем транспорт, в связи с быстрым ростом торговли и промышленности, все более нуждался в применении паровых двигателей.

Вот почему многие инженеры конца XVIII и начала XIX в. работали над изобретением паровых машин и котлов высокого давления с выхлопом отработанного пара в атмосферу.

Первая идея такой машины принадлежит немецкому ученому Леупольду, который в 1725 г. издал сочинение[1], где он описывает устройство котла и машины высокого давления с выхлопом пара в атмосферу.

[1] Leupold. Theatrum machinarum. Стр. 93—94, § 200—201, табл. XLIII, 1725.

Как видно из рис. 19, машина Леупольда должна была быть весьма простого устройства. Но она осталась только проектом. Идея Леупольда была практически разрешена в 1801 г. американцем Эвенсом, построившим паровую машину высокого давления.

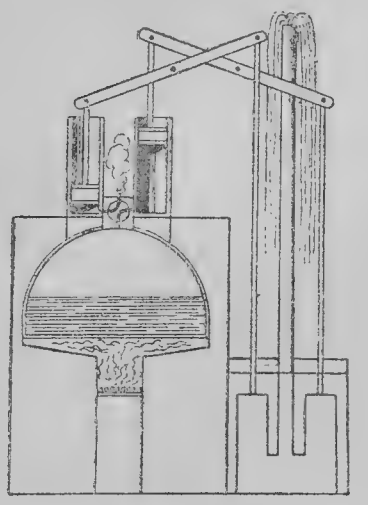


Рис. 19. Машина Леупольда.

Наряду с разработкой паровой машины высокого давления Эвенс занимался и конструированием котлов высокого давления. Он в конце XVIII в. получил патент на котел высокого давления (рис. 20), который по своему внешнему виду напоминал корнваллийский котел. Описание установки Эвенса имеется в его сочинении «Steam engineer's guide», опубликованном в 1805 г.

Котел Эвенса выполнен из чугунного цилиндра, прорезанного жаровой трубой.[1] Водяной экономайзер здесь впервые поставлен за котлом. Это позволило Эвенсу значительно повысить к. п. д. котельной установки, так как уменьшилась температура уходящих газов, а стало быть, и уменьшились тепловые потери с газами, уходящими в дымовую трубу.

Другой выгодной особенностью котла Эвенса являлась цилиндрическая форма всех его элементов. Камеры цилиндрической формы

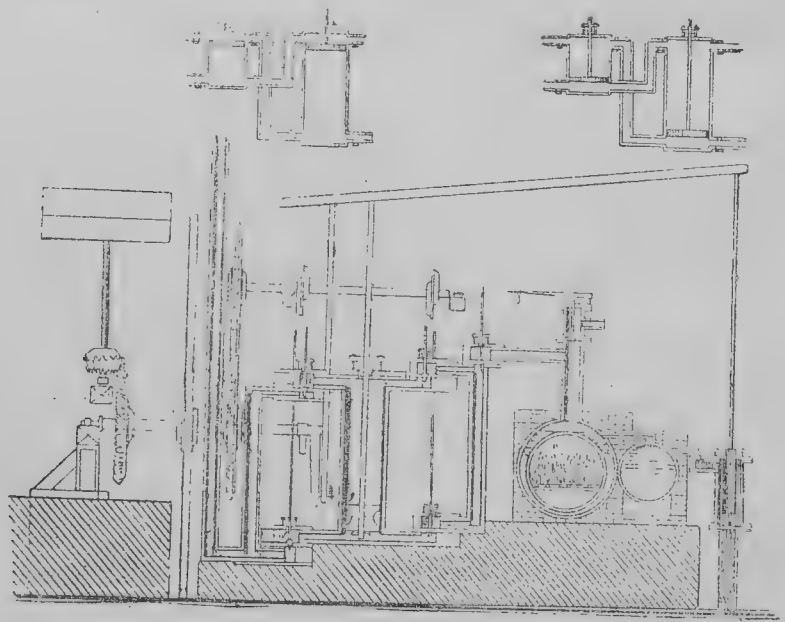


Рис. 20. Котел Эвенса, в котором производился пар давлением 8—10 *ати*.

лучше других сопротивляются внутреннему давлению, вследствие чего, при прочих равных условиях, их стенки получаются тоньше, что ведет к уменьшению веса всей установки.

[1] Жаровой ее называют потому, что по ней проходят раскаленные газы.

Кроме того котлы Эвенса имели небольшие водяные объемы, позволяющие ускорить разводку паров в котле в несколько раз в сравнении с котлами Уатта.

Наряду с этим у котла Эвенса имелись и недостатки:

1. Небольшое паровое пространство котла. Это влекло за собой унос большого количества воды из котла, следствием чего могли быть сильные гидравлические удары в паропроводе или машине.

2. Постоянная опасность оголения водой верхней части жаровой трубы, даже при малейшем невнимании эксплоатационного персонала к уровню воды в котле.

Для увеличения поверхности нагрева Эвенс предлагал строить котлы с двумя жаровыми трубами. В однотрубных и в двухтрубных котлах топки устраивались либо под котлами (внешние топки), либо в жаровых трубах (внутренние топки). В 1811 г. жаротрубный котел

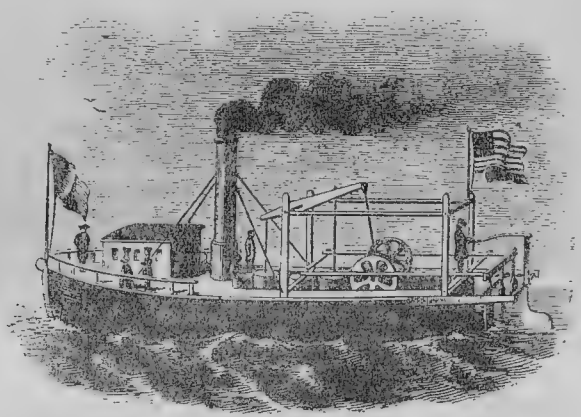


Рис. 21. Пароход Фитча.

высокого давления (7 *ати*) был построен по проекту Тривитика. Котлы Тривитика выполнялись не из чугуна, как котлы Эвенса, а из железных листов. Замена чугуна железными листами была значительным шагом вперед в котельной технике, но при постройке и эксплоатации котлов Тривитика встречались большие трудности. Слабая техника производства котлов и машин высокого давления не могла обеспечить необходимой плотности в котельных швах. Уплотнение последних пытались производить посредством свинца, пакли или смолы. Иногда же для устранения течи в котел вводили конский навоз с клеем.

Следовательно, идея цилиндрических котлов с одной и двумя жаровыми трубами была разработана в США Эвенсом, а не в Корнваллисе и Ланкашире (Англия), как это до сих пор часто считают, причем, по идее Эвенса же, котлы повышенного давления строились только из элементов цилиндрической формы.

11. Водотрубные котлы Блекея и Фитча

В 1787 г. в Америке Фитч провел опыты со своим пароходом (рис. 21). Результаты испытаний показали, что его пароход делал не более 3—4 миль в час.

В 1790 г. на другом пароходе «Perseverance» Фитч открыл регулярные рейсы для перевозки пассажиров. Паросиловая установка на данном пароходе состояла из прямоточного котла, паровой машины

и поверхностного конденсатора, который был применен на судах впервые.

После долгой борьбы Фитч получил патент на свой пароход лишь в 1791 г. Паровой котел для первого парохода Фитч построил в 1787 г. Идея устройства этого котла, вероятно, им позаимствована у Блекея (Blakey), который в 1766 г. запатентовал первый водотрубный котел [1], т. е. такой котел, у которого вся поверхность нагрева состояла из нескольких рядов труб небольшого диаметра. Внутренняя поверхность труб у этих котлов омывалась водой, а наружная — газами. Как показано на рис. 22, трубы котла соединялись между собой коленами. Краники у нижних концов труб служили: один для регулирования питания водой котла, а другой для спуска воды из котла.

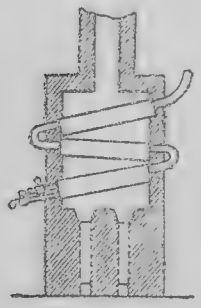


Рис. 22. Котел Блекея.

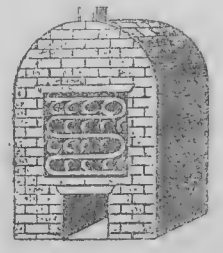


Рис. 23. Котел Фитча.

Питание котла водой происходило в нижние концы труб. Пар, образовавшийся в трубах за счет теплоты горения топлива, шел к месту потребления через верхние концы труб.

Таким образом уже в этом котле была дана идея устройства прямоточного котла, характерная особенность которого заключается в том, что в один конец трубы поступает вода, а из другого выходит пар.

Идея прямоточного котла, данная Блекеем (Blakey), была разработана более совершенно Фитчем.

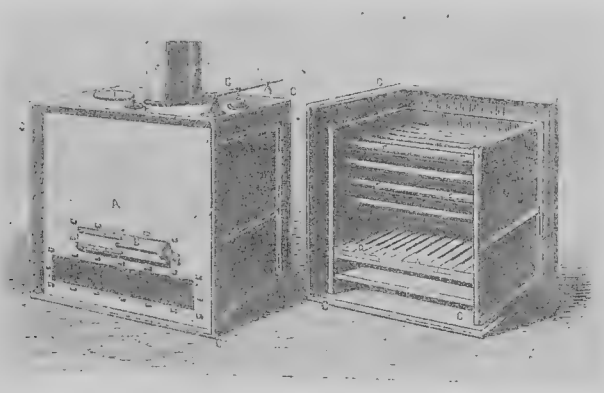


Рис. 24. Котел Барлоу.

Котел Фитча (рис. 23) состоял из одной очень длинной сварной железной трубы. Вода поступала в один конец трубы и, проходя большое количество витков, сначала нагревалась до температуры кипения, а затем к концу трубы превращалась в пар, который направлялся в машину.

[1] D. R. Stuart. Histoire descriptive de la machine à vapeur. Стр. 138—143, 1827.

Фитч же подал идею применения прямоточных водотрубных котлов на судах, но они не получили там широкого распространения. Это объяснялось тем, что технические средства топливосжигания (ручная колосниковая решетка) того времени не позволяли поддерживать правильного соотношения между количеством питательной воды и количеством топлива, подаваемого в топку для испарения воды. В результате этого несоответствия пар мог получиться или сильно перегретым или очень влажным, что в обоих случаях приносило вред паровой машине.[1]

Одновременно с Фитчем над изобретением судовых котлов и машин очень много работали Барлоу (Barlow), Рамсей (Rumsey), Сэмюель Мори (Samuel Mory), Натан Рид (Nathan Reed), Стивенс (Stevens) и др. Среди новых изобретений особого внимания заслуживают идеи Барлоу (Barlow) и Стивенса (Stevens'a).

12. Водотрубные котлы Барлоу и Стивенса (Barlow и Stevens'a)

Барлоу в 1793 г. подал мысль об увеличении поверхности нагрева судовых котлов за счет большого числа трубок малого диаметра, соединяющих два щелевых пространства котла. Поверхностью нагрева в этом котле нужно считать омываемые газами трубки, четыре боковых стенки и потолок котла (рис. 24). Модель котла Барлоу и в настоящее время хранится в музее Парижа.

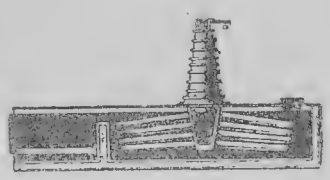


Рис. 25. Котел Стивенса.

Горизонтально-водотрубные котлы получили широкое распространение в судовых и стационарных установках. Даже и в настоящее время в эксплоатации находится много горизонтально-водотрубных котлов.

В 1804 г. американец Джон Стивенс продолжил идею Барлоу и взял патент на весьма оригинальную конструкцию котла.

Котел Стивенса (рис. 25) состоял из вертикальной стоячей камеры, из водяного пространства которой выходили лучеобразно 100 медных труб диаметром 50 *мм*. Наружные концы этих труб, заполненных водой, были закупорены. Трубки и вертикально стоячая камера снаружи омывались газами. Котел работал на небольшом пароходе.

13. Первые пароходы

Всемирная слава постройки надежно работающих пароходов принадлежит американскому инженеру Фультону. В 1802 г. Фультон начал свои опыты на маленьком пароходике, а в 1807 г. был спущен на воду (река Гудзон) «Клермонт», оказавшийся первым пароходом, вполне надежным для длительной работы. Паросиловая установка на пароходе «Клермонт», выполненная заводом Уатта и Болтона в Сохо, имела мощность 20 *и. л. с.*, тогда как предшествующие опытные пароходы обладали мощностью 1—3 *и. л. с.* Уже в 1825 г. строили судовые паровые машины мощностью в 80 *и. л. с.*

[1] Заметим, что над разработкой проекта прямоточного котла работали многие инженеры и до наших дней (см. английские патенты: 1) № 1637, 19/VII 1855 г. Исорда (Isoard M. F.); 2) № 2585 9/X 1857 г. Скотта (Scott G.); 3) № 834 4/IV 1861 г. Бенсона (Benson); 4) № 1029 25/IV 1861 г. Скотта (Scott G.) и др. См. также главу X этой книги.

Пароход «Клермонт» эксплоатировался для регулярных рейсов между гг. Нью-Йорком и Альбани. Расстояние между этими городами в 225 *км* он проходил примерно за 32 часа.

Весь мир с изумлением следил за надежностью работы парохода Фультона, но изобретателю первое время пришлось пробивать броню недоверия к своему пароходу. Никто не хотел ездить на пароходе, и первого пассажира, согласившегося совершить рейс на пароходе, Фультон в благодарность в дальнейшем возил бесплатно.

30 июня 1819 г. впервые в истории пароход «Саванна» отправился в океанское плавание, которое также закончилось с большим успехом.

Первый пароход в России был построен в 1815 г. в Петербурге Бердом для перевозки пассажиров между Петербургом и Кронштадтом.[1]

В 1814 г. во время войны США с Англией Фультоном был заложен первый военный паровой корабль водоизмещением в 2475 *т*. Паровой котел этого корабля имел 6,7 *м* длины, 3,6 *м* ширины и 2,4 *м* высоты. Корабль не достроили, так как война скоро закончилась. Первые военные паровые суда начали строиться во Франции в 1823 г. и в Англии в 1833 г.

Пароходы сравнительно хорошо справлялись с задачей быстрой и безопасной переброски пассажиров и все возрастающих масс сырья, топлива, товаров и продовольствия. Парусные же суда осуществляли свои рейсы нерегулярно, так как целиком зависели от природы.

Это обстоятельство явилось причиной довольно быстрой замены парусного флота паровым. Так, например, в 1822 г. в Америке насчитывалось до 300 пароходов, а в Англии — 150. В 1827 г. Америка имела уже 900 пароходов, а Англия — около 300 пароходов, из них 72 построены в течение 1826 года.[2]

ВЫВОДЫ

I. Развитие котельной техники, помимо общественно-экономических условий, разбор которых не входит в нашу задачу, зависело от развития промышленности каждой страны, главным образом металлургической и металлообрабатывающей промышленности, и от развития точных и специальных наук.

II. Котельная техника, развиваясь под влиянием этих причин, сама влияла на ход развития последних.

III. В результате длительного производственного опыта постройки паровых котлов и их эксплоатации выработались в начале XIX в. упомянутые выше требования, которым должен был удовлетворять каждый паровой котел.

IV. Просмотр исторического развития теплотехники подтверждает слова Энгельса, что «круговорот открытий в этой области (имеются в виду изобретения Папина, Севери, Ньюкомена, Уатта и других их современников — *П. Б.*) закончился: удалось достигнуть превращения теплоты в механическое движение. Все дальнейшее было только улучшением деталей»[3].

V. Следующие гениальные идеи, указавшие правильное направление в развитии паровых котлов, были даны еще до XIX в.:

---

[1] Сборник Института инженеров путей сообщения. Вып. XXIII, стр. 43, СПБ, 1892.

[2] Правила построения мореходных и речных пароходов. Перев. с англ. Беркова П. С., 1855.

[3] Ф. Энгельс. Диалектика природы. Соч. М. и Э., т. XIV, стр. 570, 571.

1. Введение в слой топлива подогретого воздуха (Папин, 1698 г.).

2. Применение подогрева поступающей в котел воды кипящим и некипящим экономайзером (Севери, 1698 г., и Эвенс, 1801 г.).

3. Применение на судах прямоточных паровых котлов (Фитч, 1787 г.).

4. Повышение давления пара (Леупольд, 1725 г., и Эвенс, 1801 г.).

5. Тенденция к увеличению поверхностей нагрева: а) за счет труб, вставляемых в водяное пространство котла, — котлы с дымогарными трубами (Герон, 120 лет до н. э.; Папин, примерно 1680 г.; Эвенс, 1801 г., и др.); б) за счет труб, содержащих воду, — водотрубные котлы (Герон, за 120 лет до н. э.; Блекей, 1766 г.; Фитч, 1787 г., и др.).

6. Применение на судах поверхностных конденсаторов (Фитч, 1788 г.).

VI. Технические средства того времени были недостаточны для полной реализации этих идей, да и самая потребность в таковой была тогда еще невелика. Эти гениальные идеи не получили вполне достаточного разрешения даже и в наши дни. Над осуществлением их работает научно-исследовательская мысль многих стран и в настоящее время.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К I ГЛАВЕ

1. Араго Франсуа. Историческая записка о паровых машинах. Перев. М. С. Хотинский, СПБ, 1861.

2. Божерянов Н. Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин. СПБ, 1842.

3. Брандт А. Очерк истории паровой машины и применение паровых двигателей в России. СПБ, 1892.

4. Бек Теодор. Очерки по истории машиностроения. Т. I. Перев. Е. Левкович и Б. Прозорев, М. — Л., 1933.

5. Барш Г. З. Воздухоплавание в его прошлом и настоящем. СПБ, 1906.

6. Бернштейн-Коган С. Ф., проф. Внутренний водный транспорт. Т. I, История и финансы. Москва, 1927.

7. Боголюбов. История корабля. Т. II, Москва, 1880.

8. Броиштейн Н. Ю. История техники. Вып. II, Пути и средства сообщения. М.—Л., стр. 152—196, 1926.

9. Бессонов. Развитие машин. М., 1926.

10. Кемпферт. История великих изобретений. Перев. с нем. Н. В. Миркин, Прибой, стр. 11—24, 155—163, 1928.

11. Краткий исторический очерк развития водяных и сухопутных сообщений и торговых портов в России. СПБ, 1900.

12. Гершельман Э. Ф. Исторический очерк внутренних водных сообщений СПБ, 1892.

12а. Егоршин В. За марксистско-ленинскую трактовку основных физических понятий. Журнал „За марксистско-ленинское естествознание", № 1, стр. 31—67, 1932.

13. Данилевский. Очерк истории техники XVIII—XIX вв. 1934.

14. Жанвие. Правила и руководство для начальника-механика и для управляющего машиною на пароходе. Перев. с франц. Глазенап, СПБ, 1837.

15. Загоскин. Русские водные пути и судовое дело в допетровской России. Казань, 1910.

16. Исторический очерк развития учреждений и работ ведомства путей сообщения в 1798—1889 гг. СПБ. 1898.

17. Карно Сади. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. Перев. С. Э. Фриш под ред. и с примеч. В. Р. Бурсиана и Ю. А. Крутова, 1923.

18. Кузнецов Б. В. Беседы о машинах. Москва — Ленинград, 1933.

19. Кузнецов Б. В. История энергетической техники. Вып. II. 1933.

20. Маркс К. Капитал. Т. I, 1932.

21. Милонов Ю. История паровой машины. М., 1926.

22. Радциг А. А. Джемс Уатт и изобретение паровой машины. Петроград, 1924.

23. Радциг А. А. Сади Карно и его размышления о движущей силе огня. Архив истории науки и техники. Т. III, стр. 31—49, Ленинград, 1934.

23а. Радциг А. А. История теплотехники. М.—Л., 1936.
24. Сидоров. Описательный курс паровых машин. 1925.
25. Тонков Р. Р. К истории развития паровых машин в России. Горный журнал, № 6, стр. 168—186, 1902.
26. Хотинский М. История паровых машин, пароходов и паровозов. СПБ, 1853.
27. Beck Th. Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues. Berlin, 1900.
28. Beck L. Geschichte des Eisens. Bd. III—V. Braunschweig, 1893—1903.
29. Belidor B. Architecture hydraulique. 1739, livres III—IV.
30. Branca G. Le machine. Roma, 1629.
31. Catalogue of Watt centenary exhibition. Science museum. London, 1919.
32. Catalogue officiel des collections du Conservatoire National des Arts et Métiers. Deuxième fascicule physique. Paris, 1905.
33. Caus S. de. Les raisons des forces mouvantes avec diverses machines et plusieurs desseins des grottes et des fontaines. Francfurt, 1615.
34. Darmstaedter L. u. Schuster J. Die einzige existierende Handschrift Newcomen und die neugebildete Newcomen-Gesellschaft. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie. Bd. XIII, S. 146—147, 1923.
35. Désaguliers. Cours de physique experimentale. V. II, 1751.
36. Dietrich M. Der moderne Dampfkessel der Kriegs- und Handelschiffe. Rostock, 1908.
37. Dickinson H. W. and Arthur Titley. Richard Trevitnich, the engineer and the man. 1934.
38. Dickinson H. W. Thomas Newcomen und seine Dampfmaschine. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie. Bd. XIX, S. 139—141, 1923.
39. Dickinson H. W. Stationary engines. Catalogue of the collections in the Science Museum, South Kensington. With descriptive and historical notes and illustrations. London, 1925.
40. Dickinson H. and Jenkins R. James Watt and the steam engine. The memorial volume prepared for the Committee of the Watt centenary commemoration at Birmingham. 1919, Oxford, 1927.
41. Engel E. Das Zeitalter des Dampfes in technisch-statischer Beleuchtung. Berlin, 1880.
42. Engel. Zur Statistik der Damfpkessel und Dampfmaschinen in allen Ländern der Erde. Berlin, 1874.
43. Farey J. The steam engine. London, 1827.
44. Feldhaus F. Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Berlin und Leipzig, 1914.
45. Galloway, R. L. The steam. London, 1881.
46. Geitel Max. Die Dampfmaschinen, Siegeslauf der Technik. 3 Aufl., Bd. I, S. 197—207, Stuttgart.
47. Geitel M. Geschichte der Dampfmaschinen bis James Watt. Leipzig, 1913.
48. Hachette Jean. Histoire des machines à vapeur. 1830.
49. Jäger E. Denis Papin und seine Nachfolger in der Erfindung der Dampfmaschine. 1902.
50. Knox. The Life of Robert Fulton and a history of steam. „Navigation", № 4, London, 1887.
51. Karmarsch K. Geschichte der Technologie seit der Mitte des XVIII Jahrhunderts. München, 1872.
52. Klobukow W. Zur Geschichte der Dampfmaschine (Atmosphärische Dampfmaschine von J. J. Polsunow, erbaut in Sibirien 1763—1766) mit Abb. „Prometeus", № 155, S. 810—812; № 156, S. 827—829, 1892.
53. Lardner D. Popular lecture on the steam engine. London, 1828.
54. Leupold J. Theatrum machinarum generale. 1724.
55. Maillar S. Mémoire sur la théorie des machines à feu, auquel l'Académie Impériale des Sciences de St. Pétérsbourg a adjugé le prix dans son assemblée publique. St. Pétérsbourg, 1783.
56. Matschoss C. Geschichte der Dampfmaschine, ihre kulturelle Bedeutung, technische Entwicklung und ihre grossen Männer. Berlin, 1901.
57. Matschoss C. Männer der Technik. 1925.
58. Matschoss C. Die Entwicklung der Dampfmaschine. Bd. I—II. Berlin, 1908.
59. Matschoss C. Kraftmaschinen. Das Deutsche Museum bearb. v. C. Matschoss. Berlin — München, 1925.
60. Neuburger A. Die Technik des Altertums. Leipzig, 1919.
61. Neuburger A. Die Erzeugung und Verwertung von Kraft. Siegeslauf der Technik. 3 Aufl., B. I. S. 134—163, Stuttgart.
62. Newcomen Society transactions. V. I—III, London, 1922—24.
63. Papin. The new digester. 1680.

64. Papin. Nouvelles experiences du vide, avec la description des machines qui servent à la faire. Paris. 1674.
65. Papin. Recueil des diverses pièces touchant quelques nouvelles machines et autres sujets philosophiques. Kassel, 1695.
66. Papin. Nouvelle manière d'éléver l'eau par la force du feu. Kassel, 1707.
67. Porta G. della. Pneumaticorum. Libri III, 1601.
68. Reed H. The steam engine. 1840.
69. Reuleaux F. Kurzgefasste Geschichte der Dampfmaschine. Braunschweig, 1891.
70. Savery Th. The miner's friend or an engine to raise water by fire etc. London, 1702.
71. Schmidt W. Heronis von Alexandria Druckwerke. Bd. I, 1899.
72. Stach E. Entwicklung und Anwendung der Dampfüberhitzung. Gelsenkirchen. 1901.
73. Stuart R. Histoire descriptive de la machine à vapeur. Paris, 1827.
74. Thurston. Die Dampfmaschine. Geschichte ihrer Entwicklung. 1880.

ГЛАВА II

РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ В 20—60-х гг. XIX В.

ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА

Развитие крупной машинной индустрии требовало расширения рынков. Увеличилась необходимость в быстрой, безопасной и массовой переброске все возрастающих масс сырья, топлива, товаров, продовольствия и пассажиров.

«Крупная промышленность создала всемирный рынок, подготовленный открытием Америки. Всемирный рынок вызвал колоссальное развитие торговли, мореплавания и средств сухопутного сообщения. Это снова повлияло на развитие промышленности, и в той же степени, в какой росли промышленность, торговля, мореплавание, железные дороги, развивалась буржуазия, увеличивались ее капиталы, и она отодвигала на задний план все классы, унаследованные от средневекового общества...

Потребность в постоянно возрастающем сбыте для ее продуктов заставляет буржуазию обегать весь земной шар. Всюду она должна проникнуть, всюду она старается внедриться, всюду она завязывает сношения.

Своей эксплоатацией всемирного рынка буржуазия преобразовала в космополитическом духе производство и потребление всех стран. К великому огорчению реакционеров, она лишила промышленность национальной почвы. Исконные, национальные отрасли промышленности уничтожены или уничтожаются с каждым днем. Они вытесняются новыми отраслями промышленности, введение которых является вопросом жизни для всех цивилизованных наций, теми отраслями промышленности, которые обрабатывают не только местные сырые продукты, но и произведения самых отдаленных стран, и фабричные продукты которых потребляются не только внутри страны, но и во всех частях света. Прежние потребности, удовлетворявшиеся с помощью местных продуктов, заменились новыми, для удовлетворения которых необходимы произведения отдаленнейших стран и разнообразнейших климатов. Прежняя местная и национальная замкнутость и самодавление уступают место всестороннему обмену и всесторонней взаимной зависимости народов как в области материального, так и в области духовного производства. Плоды умственной деятельности отдельных наций становятся общим достоянием. Национальная односторонность и ограниченность становятся теперь все более и более невозможными, и из многих национальных и местных литератур образуется одна всемирная литература.

Быстрым усовершенствованием орудий производства и бесконечно облегченными средствами сообщения буржуазия толкает на путь цивилизации все, даже самые варварские народы. Низкие цены товаров являются в ее руках тяжелой артиллерией, с помощью которой она разрушает все китайские стены и принуждает к капитуляции самую упорную ненависть варваров к иностранцам. Она заставляет все нации принять буржуазные способы производства, под угрозой полного их разорения; она заставляет их усвоить так называемую цивилизацию, т. е. сделаться буржуа. Словом, она творит новый мир по своему образу и подобию». [1]

С предельной ясностью К. Маркс показал, как происходит революция в транспорте и что является движущими силами ее: «...Революция в способе производства промышленности и земледелия сделала необходимой революцию в общих условиях общественно-производственного процесса, т. е. в средствах сношений и транспорта. Средства сношений и транспорта такого общества, средоточием которого, употребляя выражение Фурье [2], были мелкое земледелие с его подсобной домашней промышленностью и городское ремесло, далеко уже не удовлетворяли потребностей производства в мануфактурный период с его расширенным разделением общественного труда, с его концентрацией средств труда и рабочих, с его колониальными рынками, а потому и на самом деле претерпели переворот. Точно так же средства транспорта и сношений, завещанные мануфактурным периодом, скоро превратились в невыносимые путы для крупной промышленности с ее лихорадочным темпом производства, ее массовыми размерами, с ее постоянным перебрасыванием масс капитала и рабочих, из одной сферы производства в другую и с созданными ею новыми связями, расширяющимися в мировой рынок. Не говоря уже о парусном судостроении, претерпевшем полный переворот, в деле сношений и транспорта совершилось поэтому при помощи системы речных пароходов, железных дорог, океанских пароходов и телеграфов постепенное приспособление к крупнопромышленному способу производства». [3]

Взаимосвязь развития промышленности, торговли и транспорта можно иллюстрировать примером развития металлургии (табл. 1), текстильной промышленности, водного транспорта и других отраслей народного хозяйства.

Примерно такой же темп роста наблюдался и в текстильной промышленности; так, например, в Англии и Шотландии рост ткацких станков, работающих с центральным приводом от паровой машины, рисуется в следующем виде:

1820 г.	14 150 шт.
1829 г.	55 500 „
1834 г.	около 100 000 „ [4]

Быстрый рост текстильной промышленности обусловил собой увеличение потребления сырья и его перевозки (табл. 2).

Одновременно росли перевозки каменного угля, товаров и пассажиров. Для перевозки огромной, все возрастающей массы товаров

---

[1] Маркс и Энгельс. Коммунистический манифест. Соч. М. и Э., том V, стр. 485—487.

[2] Существенный признак каждого периода в истории человечества Фурье называл его „pivot", его стержнем, вокруг которого вращается все. (Прим. Каутского.)

[3] К. Маркс. Капитал. Т. I, стр. 290—291.

[4] В. Данилевский. Очерки истории техники XVIII—XIX вв. Стр. 32, 1934.

Таблица 1

Рост производства чугуна по годам в отдельных странах в тыс. *т* [1]

Страны	1806	1823	1834	1842	1848	1854	1860	1870	1880	1890	1899	с 1823 по 1860 г.		с 1860 по 1899 г.	
												тыс. *т*	%	тыс. *т*	%
Великобритания	258	452	900,0 [4]	1275 [5]	1975	3 069	3827	6 059	7 802	8 033	9 454	3375	747	5627	147
Германия	24,5	72	134,5	170,5	214,7 [8]	369	550	1 391	2 729	4 658	8 142	478	760	7592	1 380
Франция в границах 1806 г.	225	161,5 [2]	269	399,5	525	800 [9]	898	1 178	1 733	1 962	2 567	736,5	556	1669	186
Бельгия		40	85	95 [6]	214	300 [10]	314,7	565	608	788	1 025	274,7	787	710,3	225
Австро-Венгрия	50,5	86,5	101,8	148,4	130	260	311,7	403	464	965	1 468	225,2	360	1156,3	371
Россия	83,8	160	160	200	232,5	246	280	360	446	927	2 707	130	156	2427	903
Швеция	75	80	77	77 [7]	95,2	155	217,7	353	406	456	498	137,7	272,5	280,3	129
Италия	—	15	17,5	17,5	45	25	30	20	17	14	19	—	—	—	—
Испания	9		9	10,0	14	37	35	54	86	171	296	80	533	240	251
Остальные страны Европы	4,2		6,2	10,1	24,6	27	30	35	40	50	2	—	—	—	—
Всего в Европе	730	1067	1760	2403	3470	5 288	6494,1	10 418	14 331	18 024	26 196	5125,1	609	19701,9	303
США	24	123,4 [3]	236	230	726	668	833,5	1 691	3 896	9 353	13 839	710,1	676	13005,5	1 561
Остальные страны мира	6	11,6	20	25	50	80	96,4	100	100	250	550	84,8	871	463,6	473
Мировое производство чугуна	760	1202	2016	2658	4216	6 036	7424	12 209	18 327	27 627	40 585	6220,0	618	33171	447

[1] L. Beck. Geschichte des Eisens, т. V, стр. 896; [2] продукция 1825 г.; [3] продукция 1818 г.; [4] в 1836 г. 1088 тыс. *т*; в 1839 г. 1348 тыс. *т*; [5] 1840 г. 1396,4 тыс. *т*; 1843 г. 1215,3 тыс. *т*; [6] 1843 г. 98,0 тыс. *т*; [7] 1845 г. 80 тыс. *т*; [8] Люксембург 7,5 тыс. *т*; [9] 1855 г. 849,3 тыс. *т*; [10] 1856 г. 306,025 тыс. *т*.

нужен был гигантский рост средств передвижения. Проблема роста транспорта не могла быть разрешена только интенсификацией работы старых средств транспорта (барж, парусного флота и др.). Нужно было качественно изменить средства передвижения. В водном

Таблица 2

Импорт хлопка в Британию [1]

Годы	*т*	Годы	*т*
1701	907	1800	25 400
1720	895	1810	60 090
1741	746	1821	60 120
1751	1 350	1831	130 940
1765	1 810	1841	221 343
1785	8 345	1851	343 539

транспорте это сделала паровая машина, которая являлась в то время важнейшим механическим двигателем. После первых удачных опытов работы пароходов число последних начало расти весьма быстрыми темпами (табл. 3).

Таблица 3

Рост тоннажа парового и парусного флота (в регистровых тоннах) [2]

Годы	Пароходы	Парусные суда	Годы	Пароходы	Парусные суда
1807	150		1851	329 500	9 425 000
1821	11 500	5 240 000	1861	1 003 500	13 420 000
1831	43 000	5 085 000	1871	2 443 000	15 260 000
1841	140 500	6 377 000	1881	5 006 000	12 885 800
			1891	9 483 100	10 626 000
			1901	13 856 500	8 205 100

Из данных табл. 3 видно, что в 20—60-х гг. XIX ст. в широком масштабе начинается развитие парового флота. Одновременно вырабатываются и первые сравнительно надежно работающие конструкции судовых паровых котлов.

Рассмотрению новых требований и конструкций котлов данного периода 20—60-х гг. XIX в. посвящена настоящая глава.

На разбираемых конструкциях будет показано, как в процессе эксплоатационных и опытных наблюдений и усовершенствований ведущий для 30—50-х гг. XIX в. галерейный тип котлов был сменен новыми коробчатыми котлами, занявшими ведущее место вплоть до начала 70-х гг. XIX ст.

---

[1] Karmarsch. Geschichte der Technologie, стр. 593; см. также В. Данилевский, стр. 60.

[2] Matschoss. Die Entwicklung der Dampfmaschine. Т. 1, стр. 83, Berlin, 1908.

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЙКЕ И ЭКСПЛОАТАЦИИ СУДОВЫХ КОТЛОВ В ПЕРИОД 20—60-х гг. XIX в.

14. Уменьшение веса и габаритных размеров

На первых судах парового флота устанавливались котлы стационарного типа с небольшими изменениями. Почти во всех первых судовых котлах топки помещались внутри корпуса котла, тогда как в большинстве стационарных котлов они устраивались вне корпуса котла. Перенесение топки внутрь корпуса судового котла диктовалось желанием уменьшить вес и габаритные размеры судовых котлов в основном за счет уменьшения размеров кирпичной кладки. Полностью от применения кирпича в первых судовых котлах не решались отказаться. Так, например, пароход Фультона «Клермонт» (рис. 26) был снабжен береговым котлом размером $1{,}2 \times 1{,}3 \times 3{,}44$ $м^3$, который имел кирпичную обмуровку (рис. 27). Паропроизводительность этого котла составляла приблизительно 500 $кг$ в час.

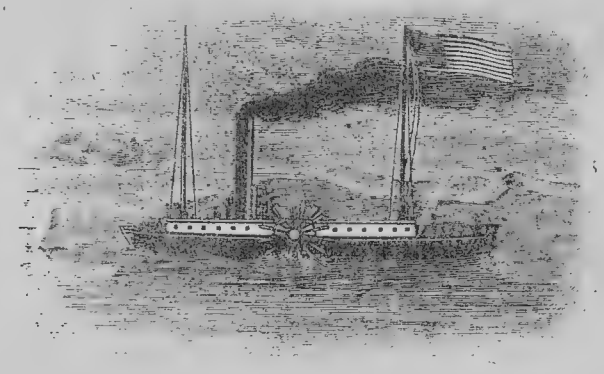


Рис. 26. Пароход „Клермонт" 1807 г.

Были пароходы, у которых даже дымовые трубы делались из кирпича. Для примера можно указать на первый пароход в России, построенный Бердом (рис. 28). Как видно из рис. 28, котел и паровая машина на пароходе Берда занимали около ¾ площади палубы

Громоздкость и большой вес паросиловой установки были общим явлением для всех пионеров парового флота (пароход Фитча — 1788 г., пароход Саймингтона — 1803 г. и др.).

Полезная же грузоподъемность пароходов и площадь для размещения пассажиров были незначительны, что отражалось на высокой себестоимости перевозки грузов и пассажиров. В связи с этим пароходовладельцы поставили перед строителями пароходов первоочередное требование: уменьшение веса и размеров паросиловой установки (котлы и машины).

Поэтому при постройке судовых паровых котлов стали отказываться от обмуровки их кирпичом, а дымовые трубы начали делать голько из металлических листов.

Значительные успехи были достигнуты и в части компактного расположения судовых паровых котлов (рис. 29).

С целью наилучшего использования объема кочегарки котлам так же, как и котельной, стали придавать коробчатую форму. Котлы такой формы строились вплоть до 70-х гг. XIX в. и считались основ-

ным типом котлов для указанного периода. Коробчатую форму придавали не только котлам, но и топкам и даже газоходам.

15. Борьба за повышение к. п. д. котла

Топливом для первых котлов служили, главным образом, дрова. Например пароход «Клермонт» отапливался сосновыми дровами. Из труб парохода часто выбрасывались языки пламени, что производило сильное впечатление, в особенности ночью. Дело не обходилось без курьезов, вплоть до появления среди невежественной части населения басен, что якобы в котле сидит нечистая сила, двигающая пароход, и что наступает конец света.

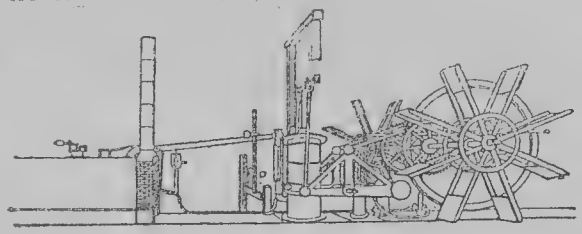


Рис. 27. Котел и машина парохода „Клермонт".

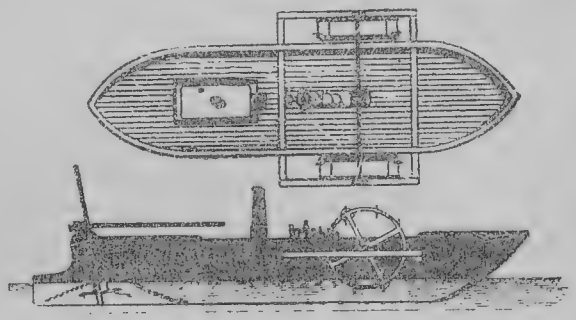


Рис. 28. Первый пароход в России, построенный Бердом.

Такие басни распространялись преимущественно владельцами парусных судов, которые видели в паровом флоте своего грозного конкурента [1]. Были даже случаи разгрома пароходов и избиения их водителей. Но пароходовладельцев, конечно, беспокоили не сказки, распространяемые конкурентами, а то, что сильно раскаленные дымовые газы уносили в трубу большое количество тепла, значительно снижая к. п. д. котла.

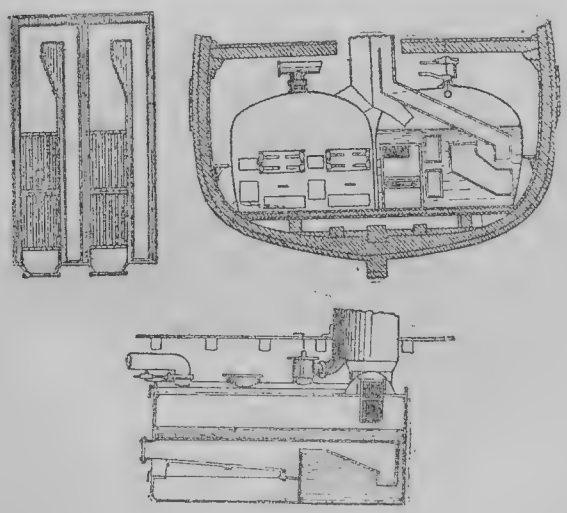


Рис. 29. Котельная деревянного парохода 1-й половины XIX в.

Для уменьшения тепловых потерь с уходящими газами судостроители увеличивали отношение поверхности нагрева котла к площади колосниковой решетки $\left[\frac{H_к}{R}\right]$. Повышение $\left[\frac{H_к}{R}\right]$ шло в основном за счет увеличения числа и длины газовых каналов. По эксплоатационным наблюдениям эти мероприятия дали заметное уменьшение тем-

[1] Аналогичные басни, а также многочисленные выступления против применения парового транспорта, как известно, имели место и при постройке первых железных дорог. (*Прим. ред.*).

пературы уходящих газов и, как следствие, понижение расхода топлива.

Для уменьшения тепловых потерь с уходящими газами, как сообщает В. Карелин, рекомендовалось производить периодический контроль температуры газов посредством свинцового прута, вставляемого в основание дымовой трубы. Если под действием дымовых газов свинцовый прут расплавлялся (температура плавления свинца равна 316° Ц), то считали, что температура уходящих газов слишком высока.

Эксплоатационные наблюдения над работой судовых паровых котлов показывали, что большой эффект в понижении тепловых потерь с уходящими газами получался при уменьшении количества воздуха, вводимого в топку. Если уменьшение вводимого в топку избытка воздуха не выходило за известные пределы, то наблюдалось заметное уменьшение расхода топлива и увеличение паропроизводительности котла.

Теоретического обоснования этих явлений в начале XIX в. дать не могли. Лишь впоследствии было установлено, что каждый сорт угля требует для своего полного сжигания совершенно определенного количества воздуха.

Если же в топку воздух будет подаваться в избытке, то он, проходя транзитом через топку и газоходы котла, отнимет от топочных газов часть теплоты и унесет ее с собой в дымовую трубу, отчего повысятся потери тепла с уходящими газами. Тепловые потери будут увеличиваться с увеличением избытка воздуха в уходящих газах.

Для возможности оценки потерь с уходящими газами было введено понятие коэфициента избытка воздуха. Коэфициент избытка воздуха за котлом выражает собой отношение действительно затраченного воздуха к теоретически необходимому количеству его для полного сгорания топлива. Коэфициент избытка воздуха всегда выше 1, главным образом потому, что никогда не удается к каждой горящей частице топлива подводить воздух в требуемых количествах. На практике к одним горящим частицам подводится воздух в большом избытке, а для других частиц его нехватает. В связи с этим появляется химическая неполнота горения топлива, т. е. сгорание его в газы (окись углерода, углеводороды, водород и др.), которые при хорошем перемешивании с воздухом и сравнительно высокой температуре смогли бы сгореть и выделить тепло. В практике, чтобы не допустить большой потери тепла от химической неполноты горения, приходится подводить к горящему топливу всегда больше теоретически требуемого количества воздуха.

Теплотехники начала XIX в. знали и практически проводили целый ряд мероприятий, направленных на уменьшение тепловых потерь, на изменение режима котла, не допуская при этом высоких температур в топке, могущих вызвать повреждение котла.

В руководстве 1837 г. для машинистов[1] имеются указания, что режим котла (температуру в топке, коэфициент избытка воздуха и паропроизводительность) можно менять изменением положения дверец зольника, поворотом дымовой заслонки или, наконец, большим или меньшим прикрытием топочных дверец.

Борьба с тепловыми потерями в топках судовых котлов первой половины XIX в. велась и по линии уменьшения провала несгоревшего топлива через решетку.

[1] Жанвие. Правила и руководства для начальника, механика и для управляющего машиной на пароходе. Перев. с франц. Глазенап. СПБ, стр. 215, 1837.

Рекомендовалось применять для котельных однородное по величине кусков топливо [1]. Для уменьшения провала топлива через решетку куски угля должны быть не очень мелкими. Но и большие куски угля также приносили вред, так как не обеспечивали равномерного подвода воздуха к топливу и могли допускать увеличение избытка воздуха. Последнее увеличивало потери с уходящими газами и от химической неполноты горения.

Несмотря на большие достижения в области повышения к. п. д. котельной установки, все же основная составляющая себестоимости перевозок — расход на топливо — оставалась высокой. Это было тем более ощутительно, что зачастую пароходовладельцам приходилось пополнять запасы топлива в иностранных портах и производить расчеты в иностранной валюте. Это было невыгодно ни пароходовладельцам ни их государствам.

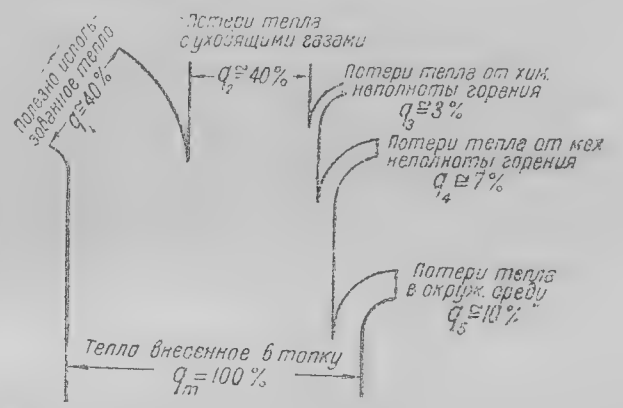


Рис. 30. Распределение тепла топлива на парообразование и на отдельные потери.

В дальнейшем было обращено внимание на уменьшение тепловых потерь за счет излучения тепла в окружающую среду стенками котла и машин. Наружные стенки котла, паропроводов и машин тщательно покрывались изоляционным материалом.

Диаграмма (рис. 30) дает наглядное представление о распределении тепла топлива на парообразование и на отдельные потери.

16. Повышение требований к топливам судовых паровых котлов

Для первых судовых котлов применялось, главным образом, древесное топливо. Это объясняется многими его преимуществами. Перечислим основные из них:

1. Большая распространенность лесов, особенно по берегам рек и озер.
2. Легкая воспламеняемость древесного топлива.
3. Почти полное отсутствие шлакообразования при сжигании дров.
4. Дешевизна топлива.

Одновременно длительная практика сжигания дров в топках судовых котлов выявила и ряд существенных недостатков их, а именно:

1. Громоздкость, что очень важно для судов с весьма ограниченной кубатурой для размещения топлива.

[1] Жанвие. Правила и руководства для начальника, механика и для управляющего машиной на пароходе. Перев. с франц. Глазенап. СПБ, стр. 215, 1837.

2. Небольшая теплопроизводительность. Так, например, 1 *кг* хвойных дров, содержащих около 30% влаги, мог выделить только 3000 *кал/кг* против примерно 7000 *кал/кг*, выделяемых при сжигании 1 *кг* каменного угля (стандартное топливо) [1].

3. Небольшая тепловая плотность дров. 1 $м^3$ дров среднего качества при сжигании может выделить только 1,3 млн. *кал*, тогда как 1 $м^3$ каменного угля дает при сжигании около 6,3 млн. *кал* (примерно в 5 раз больше).

Несмотря на перечисленные недостатки, древесное топливо осталось основным видом топлива для многих речных и озерных пароходов не только в то время, но и в наши дни. Обилие дровяных складов на берегах рек позволяло часто пополнять запасы топлива небольшими порциями, а за счет уменьшения дров на пароходах представлялось возможным увеличить полезную грузоподъемность судов.

Совсем иначе дело обстояло с отоплением морских паровых котлов. Для выхода в океанское плавание в то время полагалось принимать запасы топлива и продовольствия на срок до 20 дней.

Простой арифметический подсчет показывает, что для многих отапливаемых дровами пароходов начала XIX в. выход в двадцатидневное плавание означал бы уменьшение их полезной грузоподъемности до нуля. Такое плавание теряло всякий практический смысл, а иногда было невозможным.

Так, например, если бы тот же пароход «Клермонт», полезная грузоподъемность которого составляла примерно 80 *т*, отправился бы на двадцать дней в океанское плавание, то ему пришлось бы принять для отопления котлов около 153 *т* сухих сосновых дров, считая, что в то время на 1 *и. л. с. ч* расходовалось около 4,5 *кг* стандартного топлива.

Этот пример показывает невозможность применения дров для отопления морских паровых котлов [2].

Появление морского парового флота вызвало потребность отопления морских паровых котлов каменным углем высокой теплопроизводительности.

Замена древесного топлива каменным углем производилась не только в морском флоте, но и в стационарных паросиловых установках. К началу XIX в. очень сильно увеличился спрос на каменный уголь в металлургии и других отраслях. Это потребовало расширения его добычи и внедрения паросиловых установок в угольные шахты. Одновременно вырастала потребность в росте парового транспорта, перевозящего каменный уголь от места добычи к потребителю. Увеличивались количество и мощность паровозостроительных и судостроительных заводов.

Рост потребления каменного угля увеличил требования к его качеству. Длительной эксплоатационной проверкой сжигания каменных углей было установлено, что зола и влага являются балластом топлива.

---

[1] Стандартным называется такое топливо, 1 *кг* которого при сжигании выделяет 7000 *кал/кг*.

[2] Первые океанские суда с паровыми двигателями были, собственно, парусно-паровыми. Например пароход „Саванна" — первый, совершивший рейс из США в Европу в 1819 г. — из 26 дней рейса 18 дней шел под паром, а остальные дни — полностью под парусами. В 30-х гг. XIX в. имел место случай, когда на одном канадском пароходе, шедшем из Америки в Европу, весь груз составлял каменный уголь для работы паровых котлов. (*Прим. ред.*)

Большое содержание золы в каменном угле создавало трудности для нормального ведения горения на ручных решетках, особенно когда температура плавления золы была ниже или близка к установившейся температуре в горящем слое. В этих случаях зола расплавлялась и стекала вниз на колосниковую решетку. Там она встречала холодный воздух и обращалась в шлак. Последний не позволял производить равномерного ввода воздуха в слой топлива, отчего уменьшалась интенсивность горения и падала паропроизводительность котла.

Иногда же дело кончалось заплавлением шлаком просветов решётки и закрытием прохода воздуха в слой. Топка без доступа воздуха гасла. Для поддержания нормальной паропроизводительности котла приходилось периодически, не реже одного раза в четыре часа, производить чистку топки, что усложняло и без того тяжелую работу кочегаров.

При чистках топки, как правило, резко понижалась паропроизводительность котла. Это заставляло пароходовладельцев браковать каменный уголь с большим содержанием золы.

Влага топлива в известных пределах — не менее вредная примесь, чем зола, так как на испарение каждого килограмма воды затрачивается бесполезно около 600 *кал* теплоты топлива. Это количество тепла не воспринимается поверхностями нагрева котла, а уносится вместе с водяными парами в дымовую трубу.

Влага, как и зола топлива, является лишним весовым балластом, понижающим своим присутствием теплотворную способность топлива и увеличивающим стоимость его перевозки.

При отборе каменного угля для отопления морских паровых котлов к нему предъявлялось требование минимального содержания золы и влаги.

В 20-е гг. XIX в. к углю было выдвинуто еще одно очень важное требование — малая вероятность его самовозгорания. Явление самовозгорания каменного угля и меры борьбы с ним тогда были еще мало известны.

Вот что пишет по этому поводу Жанвие[1]:

«Нам остается еще сказать несколько слов о малоизвестном случае, который, однако же, недавно возобновился на пароходе, а именно внутреннее возгорание, без внешних причин происходящее неожиданно в угле, погруженном на пароход. Сие случилось в 1827 г. в Париже на заводе г. Верара и на купеческом судне, нагруженном каменным углем, отправляемым в г. Мартинику, которое спасено лишь тем, что шкипер велел закрыть и законопатить все люки верхней палубы. Огонь хотя и не погас, но умерен до такой степени, что судно, достигнув своего назначения, могло быть затоплено».

В настоящее время общеизвестно, что самовозгорание есть процесс окисления топлива, причем окисление лежащего в угольных ямах топлива может происходить и при нормальной температуре окружающего воздуха. Окисление угля, лежащего на поверхности, происходит медленно, благодаря низким температурам наружной среды и, наоборот, окисление угля, лежащего внутри слоя топлива, прогрессивно ускоряется ввиду непрерывного повышения температуры из-за плохой теплопроводности угля.

[1] Жанвие. Правила и руководства для начальника, механика и для управляющего машиной на пароходе. Стр. 121, 1837.

17. Сохранение в чистоте внутренних поверхностей нагрева котла

Котлы морских судов вначале питались преимущественно забортной водой. Питание судовых паровых котлов забортной водой приводило к быстрому нарастанию слоя накипи, что служило главной причиной аварий и взрывов котлов.

Борьба с накипью и ее последствиями потребовала изучения свойств питательной воды и применения ряда мер против нарастания накипи. С момента введения в эксплоатацию паровых котлов эксплоатационные наблюдения над их работой показали, что при работе котла испаряется лишь чистая вода, а растворенные в ней вещества и посторонние примеси остаются в котле.

Часть накипеобразований выпадает в виде твердых остатков, а другая часть продолжает оставаться в воде, повышая концентрацию раствора солей, кислот и взвешенных частиц. Теоретические работы по исследованию накипеобразования в котлах появились в свет лишь во второй половине XIX в. Из всех этих работ наибольшую ценность для нас представляет работа Muspratt'a. Он установил, что количество и качество осадков в котле зависит от свойств питательной воды.

Пресная речная вода содержит в себе от 0,011 до 0,033% солей.

Содержание растворенных твердых веществ в речной воде часто принято измерять не в процентах, а в немецких градусах жесткости. Каждому немецкому градусу жесткости соответствует содержание 1 *г* CaO в 100 *кг* воды.

Рассмотрим сначала свойства и состав осадков речной воды.

По исследованию Муспратта («Theoretische practische und analytische Chemie» fortgezetzt von B. Kerl Braunschweig, 1870 г.) осадок пресной воды содержит в себе:

Углекислой извести	от 0,0046	до 0,0206%
„ магнезии	„ 0,0002	„ 0,0049%
Сернокислой извести	„ 0,0003	„ 0,0080%
Других сернокислых солей	„ 0,0002	„ 0,0049%
Хлористых металлов	„ 0,0002	„ 0,0101%
Кремневой кислоты	„ 0,0002	„ 0,0050%
Глинозем и окиси железа	„ 0,000	„ 0,0048%
Органических веществ	следы	„ 0,0100%

При поступлении пресной воды в котел и последующем ее нагревании сначала выпадает углекислая, потом сернокислая известь, далее железистые соединения. Магнезия и углекислая известь выпадают из воды целиком лишь при температуре 144° Ц.

Если в питательной воде нет или очень мало других солей, то углекислая известь осаждается на стенках котла в виде неприкипающей тестообразной массы.

Значительное скопление такой массы в отдельных обогреваемых местах котла могло вызвать и вызывало местный перегрев металла с последующим взрывом.

Сернокислая известь, или гипс, выделяется из воды тоже при температуре 144° Ц. Гипс отлагается на стенках котла в виде твердых иглообразных кристаллов. В соединении с углекислой известью и магнезией гипс образует твердый слой накипи, иногда трудно отделяемый от поверхности даже металлическими инструментами.

Практика обслуживания котла указала на необходимость систематического и тщательного удаления слоя накипи с поверхностей нагрева котла.

Нарастание слоя накипи, особенно на омываемых пламенем поверхностях нагрева, могло привести и часто приводило к пережогу стенок и даже взрыву котла.

Пережог загрязненных стенок объясняется плохой теплопроводностью слоя накипи, которая примерно в 100 раз меньше теплопроводности железа (табл. 4а).

Таблица 4а

Материал	Коэфициент теплопроводности *кал/м час°Ц*
Железо	50
Масло	0,1
Силикаты	0,2—0,5
Гипс	0,5—7,0
Карбонат кальция (аморфный)	0,2—1,0
Карбонат кальция (кристаллический)	0,5—5,0

Для наглядного представления о степени влияния толщины и теплопроводности накипи на температуру стенок котла, а стало быть, и на возможность их пережога приведен рис. 31 (здесь δ — толщина слоя накипи в *мм*, λ — коэфициент теплопроводности накипи в *кал/м час°* Ц).

Рис. 31 показывает, что при отсутствии слоя накипи ($\frac{\delta}{\lambda} = 0$) можно не бояться перегрева стенок даже при температуре топки в 1500° Ц.

Если же стенки топки покрыты слоем гипсовой накипи толщиной лишь в 2 *мм*, то температура стенки может повыситься до 700° Ц уже при температуре топки в 1100° Ц ($\frac{\delta}{\lambda} = 3$).

Перегрев котельных стенок опасен для нас потому, что с повышением температуры металла падает прочность котельных стенок. Обстоятельное исследование этого вопроса было проведено в конце XIX в.[1]

Одновременно с повышением температуры стенки слой накипи вызывает также понижение паропроизводительности котла. Газы передают через покрытые накипью стенки котла значительно меньшее количество тепла, чем через чистые.

Температура за котлом резко повышается, отчего увеличиваются и потери с уходящими газами.

Рис. 32, на основании исследований, специально проведенных с опытным котлом[2], показывает, как изменяется перерасход топлива в зависимости от толщины слоя накипи. Из изложенного ясно, насколько велика опасность накипеобразования, часто ведущая к большому перерасходу топлива, перегреву поверхностей нагрева и даже взрывам котла.

Эксплоатационной практикой была выявлена допустимость нарастания слоя накипи на такую толщину, чтобы температура стенки металла могла превышать температуру воды в котле не более, чем на 100 и в крайнем случае на 200° Ц.

[1] Ledebur A. Der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften der Metalle ins besonderere des Eisens. VDI. S. 565—573. 1896.

[2] Stumper. Die Wärme. № 18—20, 1934.

Реальными мерами борьбы с накипеобразованием оказались: 1) периодическая очистка поверхностей нагрева котла от накипи специальными инструментами, 2) нижнее и верхнее продувание котла. Последнее имеет целью удаление масла, плавающего на поверхности воды в котле. Нижнее же продувание котла служит для спуска шлама и ила, для понижения концентрации растворов солей и кислот и для уменьшения количества взвешенных в котловой воде посторонних примесей. Уменьшение концентрации раствора достигается спуском котловой воды через установленный на дне котла кран нижнего продувания. Взамен спущенной воды с большим содержанием солей добавляют свежую менее соленую или менее жесткую воду, отчего средняя соленость котловой воды понижается.

Уменьшение концентрации солей и других механических примесей посредством нижнего и верхнего продувания отличается исключительной простотой и надежностью и получило широкое применение в судовых и стационарных котельных установках, сохранившись до наших дней.

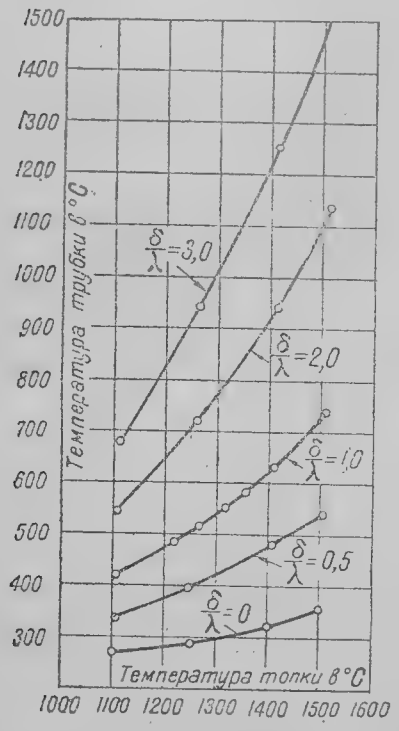


Рис. 31. Изменение температуры стенки котла в зависимости от температуры топки и $\frac{\delta}{\lambda}$.

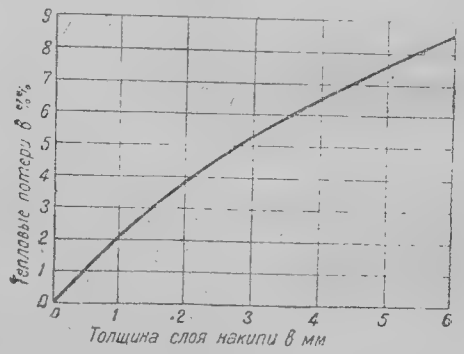


Рис. 32. Изменение перерасхода топлива в зависимости от толщины слоя накипи.

Единственным серьезным недостатком продувания котла является сравнительно большой унос тепла продуваемой котловой водой.

Понижение к. п. д. котла за счет тепловых потерь с продуваемой котловой водой было замечено в 30-х гг. XIX в. Еще тогда для уменьшения этих потерь рекомендовалось в трубе продувания устанавливать концентрическую трубу для добавления питательной воды взамен продуваемой или превращенной в пар. Данное простое устройство дало большой эффект в деле уменьшения тепловых потерь.

Использование морской воды для питания котлов приносило в несколько раз больший вред, чем питание их пресной речной водой. Количество растворенных веществ в морской воде колеблется от 0,75% до 4,3%, т. е. примерно в 100 раз больше, чем в пресной речной воде.

Очень часто соленость морской воды измеряют не в процентах,

а в градусах Брандта (1° Б соответствует содержанию 1 *г* поваренной соли в 100 *кг* воды).

В морской воде, содержащей более 3% растворимых веществ, найдено:

Поваренной соли	от 2,23	до 3,1%
Хлористой магнезии	„ 0,23	„ 0,600%
Гипса	„ 0,014	„ 0,160%
Сернокислой магнезии	„ 0,2	„ 0,7%
Углекислой извести и других . . .	„ 0,003	„ 0,013%

Из всех вышеупомянутых веществ наименьший вред для котла приносит поваренная соль. Она выделяется из морской воды лишь при 12% ее раствора и температуре в 100° Ц и к стенкам котла прикипает весьма слабо. При последующем питании котла пресной водой, соль, осевшая на поверхность нагрева котла, снова растворяется.

Наиболее вредной составной частью солей морской воды является гипс, который, как уже указывалось, выделяется из воды при температуре в 144° Ц.

Для уменьшения выпадения гипса из котловой воды температуру воды в коробчатых и цилиндрических котлах не доводили выше 138° Ц или, что все равно, давление в котле не поднимали выше 3,5 *ата*.

Путем своевременного продувания общую соленость воды в котле не допускали выше 10 000° Б, т. е. не выше 10% содержания твердых веществ, растворенных в котловой воде.

Периодическое продувание котла, питаемого морской водой, и чистка его от накипи и грязи, а также поддерживание давления пара в котле не выше 3,5 *ата* при эксплоатационной проверке оказались такими же реальными мерами борьбы с накипеобразованием, как и на речных пароходах.

Коробчатые и цилиндрические котлы получили широкое применение вплоть до конца XIX в., несмотря на то, что питание их все время производилось неочищенной морской водой.

18. Повышение давления в котле

При постройке и эксплоатации стационарных паросиловых установок во главу угла ставилось получение наибольшего к. п. д. Этому требованию подчинялось все остальное, а именно размеры и вес паросиловой установки, ее мощность и т. д.

Совсем иначе обстояло дело в судовых силовых установках. Для них первостепенную роль играли размеры, вес и мощность силовой установки.

Для уменьшения веса и габаритных размеров применялось подсказанное эксплоатационной практикой увеличение числа ходов поршня в паровых машинах в единицу времени.

Увеличение числа оборотов паровой машины при одинаковом давлении и габаритных размерах ее было возможно лишь при условии увеличения паропроизводительности котельной установки. Для повышения паропроизводительности увеличивали как поверхность нагрева котла, так и паросъем с 1 $м^2$ ее.

Последнее часто достигалось увеличением весового напряжения решетки $\left[\frac{B}{R}\right]$ путем применения нижнего дутья.

Весьма эффективной мерой не только для уменьшения габаритных размеров и веса, но и для увеличения к. п. д. оказалось повышение давления в котле.

«Стали применять высокое давление, — цитирует Маркс Несмита,— раньше на предохранительный клапан навешивалась такая нагрузка, что он открывался уже при давлении в 4,6 или 8 фунтов на квадратный дюйм; теперь было найдено, что повышение давления до 14—20 фунтов... приводит к весьма значительному сбережению угля»[1].

Отдельные изобретатели достигли сказочных результатов в части повышения давления пара. В 1828 г. Альбан построил паровую машину мощностью в 10 *и. л. с.* при начальном давлении в 45,7 *ат*. Машина делала 60 оборотов в минуту. Диаметр цилиндра имел всего 76,2 *мм*, а ход поршня 457 *мм*. Паровая машина Уатта ординарного действия мощностью в 10 *и. л. с.* имела диаметр цилиндра в 610 *мм*, ход же поршня составлял 1830 *мм*. Машина Уатта делала 18 оборотов в минуту.

Сравнивая габаритные размеры цилиндров вышеупомянутых машин, мы видим, что у машины Уатта при той же мощности объем парового пространства цилиндра в 250 раз более, чем у машины Альбана.

Машина Альбана, имевшая исключительный для того времени успех, была лишь экспериментальной установкой, так как технические средства того времени не позволяли производить паровых котлов, вырабатывающих пар давлением до 50 *ат*. Машина Альбана осталась машиной-уникумом.

Максимальное давление пара, которое допускалось прочностью строившихся до середины XIX в. паровых котлов в стационарных установках, было 5 *ата*.

Давление же пара в морских паровых котлах, питающихся морской водой, не превышало 3,5 *ата*. При более высоком давлении внутренняя поверхность в котлах очень скоро зарастала большим слоем накипи, приводившим к резкому снижению паропроизводительности и к частым взрывам котла.

Но увеличение давления пара в морских котлах до 3,5 *ата* для 30—50-х гг. XIX в. означало колоссальный прогресс в истории котельной техники, если вспомнить, что до 1830 г. давление пара в 0,3—0,5 *ати* считалось высоким и редко применялось.

Повышение давления пара в морских паровых котлах осуществляли постепенно, заменяя дымогарные трубы прямоугольного сечения трубами цилиндрической формы. С той же целью производилась замена коробчатой формы корпуса котла овальной и цилиндрической формой. Для повышения прочности стенок котла их связывали болтовыми связями. С повышением давления количество болтовых связей увеличивалось.

19. Повышение паропроизводительности котла

Быстрый рост промышленности и торговли в первой половине XIX в. вызвал необходимость увеличения парового флота как по числу судов, так и по их мощности.

Старые пароходики типа «Клермонт» водоизмещением в 150 *т* вскоре не смогли удовлетворять капиталистов. Вместо них стали строить суда с полезной грузоподъемностью в 500 *т* и более. Уве-

[1] К. Маркс. Капитал. Т. III, стр. 57, 1932.

личение тоннажа пароходов потребовало в свою очередь увеличения паропроизводительности котлов.

Первое время увеличение паропроизводительности котла шло за счет увеличения поверхностей нагрева котла и повышения часового паросъема с 1 $м^2$ ее.

В этой области строителям и эксплоатационному персоналу котлов удалось достигнуть колоссальных успехов. В конце первой половины XIX в. часовая паропроизводительность отдельных котлов была доведена до 8,5 $т$, а поверхность нагрева котла увеличена до 250 $м^2$.

20. Подготовка кадров

Многочисленные аварии и взрывы котлов часто сопровождались человеческими жертвами и гибелью судов.

Например, приведем случай одновременного взрыва трех котлов, происшедший на французском пароходе «Рон» 14/III 1827 г. Взрыв произошел во время испытания парохода в присутствии всего городского управления. Пароход взлетел на воздух. Обломками его было убито несколько зрителей на набережной реки Роны. Палуба была разбросана на большое расстояние. Вершина котла весом в 60 пудов упала на расстоянии 720 футов от парохода (см. Жанвие, стр. 172).

При исследовании причин взрывов котлов оказывалось, что основными из них были:

1) неправильный и небрежный уход за котлами вследствие недостаточной квалификации обслуживающего персонала;

2) неисправность питательного насоса и арматуры (предохранительного клапана, манометра, водомерных стекол).

Происходившие аварии и взрывы котлов приносили большие убытки пароходовладельцам и ставили под угрозу успех пароходов отдельных фирм.

Практикой постепенно были выдвинуты отдельные требования по уходу за котлами и повышению квалификации персонала, обслуживающего котел. Ни один рабочий уже не допускался к уходу за котлом, если проверкой было установлено слабое знание им правил ухода за котлами.

Для обучения персонала еще в первой половине XIX в. появилось печатное руководство для механиков и машинистов пароходов Жанвие, 1837 г., и др.

Следующая выдержка из названной книги Жанвие дает нам представление об основных требованиях, предъявляемых в то время к кочегарам. «Кочегару должно знать все причины, которые могут повредить машину, и каким образом вести огонь; ему должно также знать все опасности, происходящие от излишнего давления паров и от значительного понижения горизонта воды в котле, наконец, ему должны быть известны все изложенные в сем сочинении причины опасности и средства, оным противодействующие. Осторожность, внимательность и трезвость для кочегара несравненно нужнее, нежели чрезвычайная телесная сила. На манометры, термометры, пробные краны и предохранительные золотники кочегару должно обращать непрестанное крайнее внимание» [1].

Категорически запрещалось повышать давление пара в котле выше допустимого по условиям прочности котла, а также упускать воду из

---

[1] Жанвие. Правила и руководство для начальника, механика и для управляющего машиной на пароходе. Стр. 21, 1837.

водомерного стекла. Если вода оказывалась упущенной, то предлагалось немедленно гасить топку и прекращать питание котла. Эти меры иногда предупреждали взрывы.

В целях предупреждения аварии котлов от неисправности арматуры и приборов появилось требование удваивания ответственных приборов и арматуры котла (предохранительный клапан, водомерные стекла, манометры и др.) и содержания их в постоянной исправности.

21. Простота и надежность работы котлов

Из всех выдвинутых в эпоху капитализма требований, предъявляемых к постройке и эксплоатации паровых котлов, наиболее важными были простота конструкции и обслуживания котлов.

Это требование осталось основным и до наших дней, и еще в первой половине XIX в. при оценке каждого котла главное внимание обращалось на возможность легкой очистки от накипи и грязи внутренних поверхностей нагрева котла. Считалась большим преимуществом котла возможность очистки во время работы его наружных поверхностей нагрева. Своевременная чистка котлов после определенного периода работы была введена еще в начале XIX в. Загрязнение стенок котлов являлось главной причиной повышения тепловых потерь с уходящими газами и уменьшения паропроизводительности котла.

Не менее важные требования предъявлялись и к конструкции котла: наибольшая простота и легкость изготовления, а также и необходимого ремонта.

Котел, наилучшим образом удовлетворяющий поставленным здесь требованиям, редко выходил из строя на ремонт, что было очень важно для работы котла в судовых условиях.

От изложения общих требований, предъявляемых к постройке и эксплоатации судовых паровых котлов в период 20—60-х гг. XIX в., перейдем к описанию наиболее характерных конструкций котлов для данного периода. Вначале рассмотрим четырнадцать конструкций котлов американского военного и торгового флота, работавших на судах в 20—40-х гг. XIX в.[1].

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ В ПЕРИОД 20—60-х гг. XIX в.

ЛАБИРИНТНЫЕ КОТЛЫ

22. Котлы Мэррика и Тауна (Merrick & Towne) (США)

На рис. 33 показан котел американского военного корабля «Princeton» водоизмещением в 663 *т*. Характеристику котла см. табл. 4[2], № 1.

На основании опытных характеристик котла, необходимо отметить сравнительно высокие: $\frac{V_к}{H_к} = 0{,}5\ \frac{м^3}{м^2}$[3] и $\frac{V_к}{D_к} = 41{,}5\ \frac{м^3}{т \cdot ч}$[4]. Рассматриваемый

---

[1] Bartol B. H. A treatise on the marine boilers of the Unit. St. Philadelphia, 1851.

[2] Табл. 4 помещена в конце II главы, стр. 78—79.

[3] $\frac{V_к}{H_к}$ — отношение объема, занимаемого котлом, к поверхности нагрева котла

[4] $\frac{V_к}{D_к}$ — отношение объема, занимаемого котлом, к часовой паропроизводительности котла.

котел в этом отношении имеет значительные преимущества по сравнению с первыми судовыми паровыми котлами.

Описываемый котел был выполнен из железа. Изготовление судовых котлов из железа в первой четверти XIX в. было редким явлением. Применяемые тогда технологические процессы выделки железных листов не обеспечивали однородности структуры металла в листе.

Даже у самых лучших по качеству обработки иоркширских железных листов внутри часто встречались шлаковые прослойки, наличие которых в то время было очень трудно обнаружить. Если же железный лист со шлаковой прослойкой употребляли для постройки котла, то на месте шлаковой прослойки обычно образовывался пузырь. Приходилось останавливать котел на капитальный ремонт.

Внутреннее устройство котла схематически можно представить так: в котле помещались две топки прямоугольного сечения. Колосниковые решетки топок заканчивались железными порогами, омываемыми изнутри котловой водой.

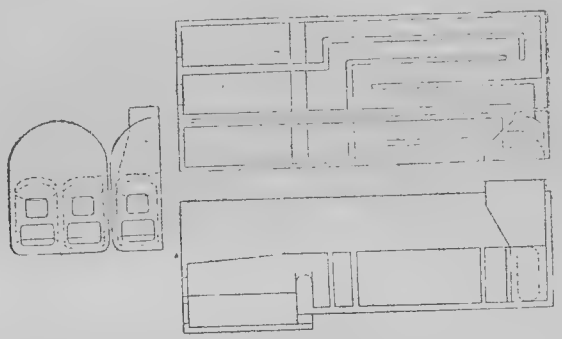


Рис. 33. Котел парохода „Princeton."

Газы, получаемые от сжигания антрацита, шли вначале по двум газоходам, потом поворачивали на 180° и проходили уже по одному газоходу. Затем они снова делали поворот на 180°, омывали последний канал и уходили в дымовую трубу, расположенную на среднем котле.

Газоходы имели прямоугольное сечение размером $1{,}20 \times 0{,}36$ $м^2$. Такой размер газовых каналов позволял рабочим проникать внутрь газоходов для очистки их от золы и сажи.

Рабочее давление в котле поддерживалось около 0,9 *ати*. Для того времени это давление считалось весьма высоким. Оно более чем в три раза превышало среднее давление пара в котлах, строившихся в 90-х гг. XVIII в.

Котлы Мэррика и Тауна являлись шагом вперед в развитии техники судового котлостроения.

Основные преимущества их:

1. Употребление в качестве котлостроительного материала железа вместо применяемой ранее красной меди — весьма дорогого и редкого металла.
2. Возможность питания котла морской водой.
3. Компактное расположение котлов в кочегарке.

Но котлы Мэррика и Тауна имели и недостатки, как-то:

1. Весьма низкий к. п. д. котла (30%).
2. Малое весовое напряжение решетки $(\frac{B}{R} = 51\ кг/м^2ч)$.

3. Возможность заполнения илом или шламом пространства между дном газоходов и котла, отчего мог произойти перегрев нижних стен газовых каналов с последующим повреждением их и даже взрывом котла.

4. Невозможность очистки газоходов от золы и сажи во время работы котла.

5. Возможность раздувания стенок котла, так как коробчатая форма газоходов плохо сопротивляется давлению в котле. Раздувание стенок котла влекло за собой понижение уровня воды в котле и даже взрыв его. В дальнейшем для уменьшения опасности раздувания котла все его стенки и газоходы скреплялись между собой болтовыми связями, отчего очень сильно загромождались паровое и водяное пространства котла.

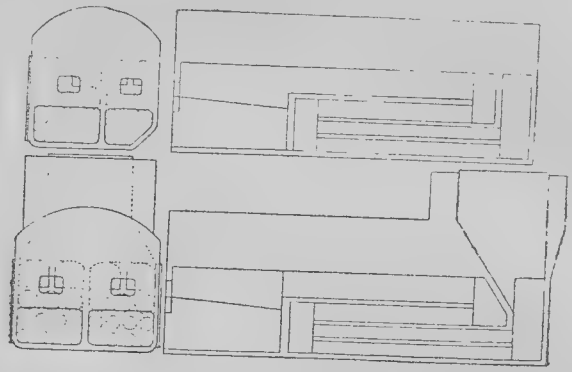


Рис. 34. Котел галерейного типа военного корабля „Saratoga."

6. Недоступность для осмотра и ремонта пода котла, двух боковых стен у среднего котла и по одной боковой стенке у крайних котлов.

Все перечисленные здесь недостатки и послужили главной причиной ограниченного применения рассмотренного типа котлов как в американском, так и в европейском флоте.

На смену котлам Мэррика и Тауна пришли котлы, так называемого галерейного типа, у которых уже часть поверхности нагрева имела цилиндрическую форму.

КОТЛЫ ГАЛЕРЕЙНОГО ТИПА

23. Котлы Джебиз Кони (Jabez Coney) (США)

Галерейными эти котлы называются потому, что газы движутся в них как бы по уступам вниз или вверх.

На рис. 34 показан котел американского военного корабля «Saratoga» водоизмещением 1426 *т*. Данный котел был построен из красной меди, что дало возможность эксплоатировать его не менее 15 лет, против 5 лет работы железных котлов того времени. В табл. 4, № 2, приведены все его основные характеристики. Выгодной особенностью котлов галерейного типа является:

1. Увеличение паронапряжения поверхности нагрева котла $\frac{D}{H_к}$ до 14,2 *кг/м²ч* против 12 *кг/м²ч* у ранее рассмотренного котла, т. е. почти на 20%.

2. Устройство части поверхности нагрева котла из труб цилиндрической формы, которые не требовали скрепления их болтовыми связями.

Обладая указанными преимуществами, котлы галерейного типа имели и много недостатков. Все недостатки котлов типа Мэррика и Тауна с полным правом можно отнести и к котлам галерейного типа. Кроме того, к их недостаткам надо добавить и значительное удорожание стоимости котла из-за высокой стоимости котлостроительного материала — меди. В процессе работы галерейные котлы подверглись ряду конструктивных изменений. Основное из этих изменений — устройство отверстий с фронта котла против каждой дымогарной трубы. Открытие отверстий давало возможность производить во время работы котла очистку поверхности нагрева от золы и сажи. В остальное время отверстия закрывались крышками.

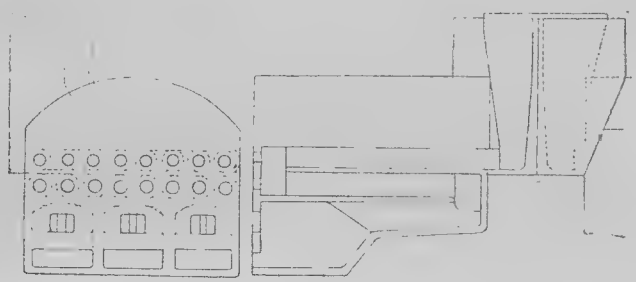


Рис. 35. Котел парохода „Mississippi".

24. Вторая конструкция котла Мэррика и Тауна (США)

На рис. 35 показан котел американского военного корабля «Mississippi» водоизмещением в 1788 *т*. Табл. 4, № 3, дает представление об его основных характеристиках.

Данные котлы отличались от ранее рассмотренных котлов Джебиа Кони тем, что давали возможность:

1) очистки и удаления через фронтовые лючки накопившейся на поверхности нагрева золы и сажи даже во время работы котла;

2) осмотра и ремонта не только боковых стенок, но и части пода котла.

В данных котлах прибавился целый ряд новых недостатков:

1. Низкий к. п. д. котла $\eta \cong 40\%$ против 55% у предыдущего котла.

2. Большая вероятность перегрева пода нижних газоходов из-за накопления ила на дне котла, так как по нижним газоходам шли наиболее раскаленные газы.

Несмотря на указанные недостатки, галерейные котлы рассмотренного типа получили довольно широкое распространение вплоть до 40-х гг. XIX в.

Дальнейшие конструктивные изменения данных котлов шли по линии увеличения паронапряжения котла.

25. Котлы Стэкхауза и Томлинсена (Stackhouse & Tomlinson) (США)

На рис. 36 показан котел системы Стэкхауза и Томлинсена, установленный на американском военном корабле «Michigan» водоизмещением 518 *т*. Основные характеристики этого котла приведены в табл. 4, № 4.

Данные таблицы говорят об очень больших достижениях при постройке котлов Стэкхауза и Томлинсена. Паронапряжение поверхности нагрева увеличилось до 26 *кг/м²ч*, т. е. примерно в два раза превысило $\frac{D}{H_к}$ у котлов Мэррика и Тауна, установленных на пароходе «Mississippi».

Число газоходов удалось уменьшить до двух, благодаря чему уменьшилось сопротивление движению газов, а стало быть, повысилось весовое напряжение решетки до 80 *кг/м²ч*, т. е. примерно в 1½ раза выше, чем у котлов Джебиз Кони (Jabez Coney).

Постройкой котлов для парохода «Michigan» из железа было разбито ранее существовавшее убеждение, что железные паровые котлы дают худшие эксплоатационные характеристики и менее прочны, чем котлы медные.

К 40-м гг. XIX в. были достигнуты большие успехи в производстве железных листов, что было не случайным. В связи с быстрым ростом парового флота ограниченные возможности добычи и обработки меди грозили стать тормозом для дальнейшего развития

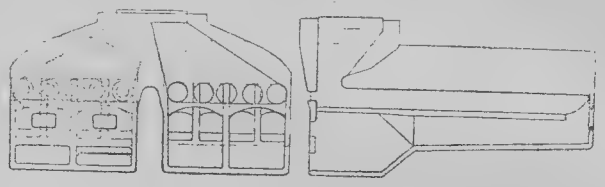


Рис. 36. Котел парохода „Michigan".

котлостроения. Это обстоятельство потребовало усиления работы металлургических заводов над улучшением качества выпускаемых железных листов. Старания металлургов не пропали даром. Технологический процесс производства железных листов был настолько улучшен, что часто удавалось производить листовое котельное железо не хуже, а даже лучше медных листов. В результате перешли на постройку преимущественно железных котлов.

Недостатки котлов Стэкхауза и Томлинсена сходны с недостатками котлов Джебиз Кони. Необходимо особенно подчеркнуть наличие плоских стен, требующих большого количества связей, которые делали конструкцию котла жесткой. Паропроизводительность котла часто ограничивалась жесткостью конструкции. Последняя препятствовала свободному расширению наиболее нагретых частей котла, следствием чего являлись высокие термические напряжения. Зачастую дело заканчивалось появлением трещин, а иногда даже взрывами котла.

Котлостроительные заводы и их конструкторы усиленно работали над заменой плоских стенок котла цилиндрическими.

На примерах ранее рассмотренных котлов мы уже видели, как постепенно и осторожно заменялись трубы прямоугольного сечения трубами цилиндрической формы. Последующие два котла могут служить примером уже почти полной замены плоских стенок цилиндрическими.

26. Третья конструкция котлов Мэррика и Тауна (США)

На рис. 37 и 38 показан котел озерного коммерческого парохода «Empire State» водоизмещением 1570 *т*. Весь корпус и газоходы

котла имели цилиндрическую форму, что позволило почти полностью освободиться от болтовых связей.

Рассмотрение эксплоатационных данных работы этих котлов заслуживает особого внимания, так как они дали весьма высокое паронапряжение поверхности нагрева (табл. 4, № 5).

Анализ таблицы и конструктивной схемы котла позволяет нам отметить следующие основные преимущества его:

1. Весьма высокое паронапряжение поверхности нагрева котла $\frac{D}{H_к} = 33{,}5$ *кг/м²ч*, т. е. почти в три раза превышавшее среднее для того времени $\frac{D}{H_к}$.

2. Цилиндрическая форма котла и поверхностей нагрева, которая не только давала возможность увеличить давление в котле и освободиться от связей внутри его, но и допускала наружный ремонт и осмотр котла, даже при условии весьма близкой установки котлов друг к другу. Это позволяло сделать котельную компактной.

3. Ранее компактность судовых котельных часто достигалась за счет вынужденного отказа от осмотра и ремонта стенок котла, плотно прилегающих к соседнему котлу. Это сокращало срок службы котлов, а иногда выводило из строя паровое судно на продолжительный срок для капитального ремонта котлов.

4. Относительно хорошая эластичность поверхностей нагрева котла, достигнутая зигзагообразностью газоходов. При надежном соединении труб со стенками поворотных дымовых камер хорошая эластичность служила одной из главных причин получения высоких $\frac{D}{H_к}$.

5. Зигзагообразное устройство газоходов позволяло обнажать для удара факела только один ряд труб, в связи с чем меньшее количество труб находилось в чрезвычайно тяжелых термических условиях работы.

Зигзагообразное устройство газоходов имело и свои недостатки:

1. Невозможность очистки поверхностей нагрева от золы и сажи во время работы котла.

2. Большая вероятность заноса поворотных камер золой и трудность ее удаления из последних. Большое накопление золы в поворотных камерах объясняется резким уменьшением в них скорости газов и изменением их направления на 180°.

3. Чрезвычайно большая трудность осмотра трубных досок и устранения течи в них.

Быстрая замена поврежденных труб в котлах представляла почти непреодолимые препятствия.

Несмотря на все недостатки, котлы галерейного типа получили довольно широкое распространение во флоте, причем успех часто подогревался рекламой сказочных для того времени паронапряжений поверхностей нагрева.

В качестве примера приведем основные данные и конструктивную схему котла, давшего рекордное в то время паронапряжение поверхности нагрева.

27. Котлы завода Аллер (Allaire) (Нью-Йорк, США)

Котел был установлен на речном пароходе «Empire State» тоннажем в 1551 *т* (рис. 38). Как показывает табл. 4, № 6, паронапряже-

ние $\frac{D}{H_к}$ составляло 45 *кг/м²ч*, т. е. почти столько, сколько дает большинство работающих в настоящее время судовых водотрубных котлов.

Из всех данных этой таблицы, кроме весьма высокого $\frac{D}{H_к}$, обращает на себя внимание также большое значение $\frac{B}{R} = 194$ *кг/м²ч*, достигнутое благодаря применению вентиляторного дутья под колосниковую решетку.

Галерейные котлы оставались бы основным типом котлов даже и в 50-х гг. XIX в.[1], если бы упорная работа над устранением основных недостатков их не позволила сконструировать более простые по устройству и надежности работы коробчатые котлы.

Прежний интерес к постройке галерейных котлов несколько остыл, и, наоборот, начали уделять усиленное внимание постройке и освоению коробчатых котлов.

КОРОБЧАТЫЕ КОТЛЫ

28. Котлы Морриса и Ко (Morris & Co) (США)

На рис. 39 показан коробчатый котел американского речного парохода «America» тоннажем 508 *т*. Основные характеристики котла приведены в табл. 4, № 7.

Анализ конструктивной схемы и эксплоатационных характеристик данного котла позволяет установить следующие основные преимущества его:

1. Наибольший в сравнении с предыдущими котлами к. п. д. котла $\eta = 54\%$, при одновременном сохранении высокого $\frac{D}{H_к} = 43$ *кг/м²ч* и $\frac{B}{R} = 143$ *кг/м²ч*.

2. Легкая возможность осмотра и очистки всех частей котла.

3. Большие зеркало испарения и паровое пространство котла, позволявшие форсировать работу его при сравнительно спокойном парообразовании. Это создавало меньшую вероятность вскипания и уноса воды, вызывавших повреждения и гидравлические удары в паропроводах и машинах.

4. Небольшие сопротивления движению газов, обусловленные их малыми скоростями и только двумя поворотами.

Наряду с новыми преимуществами котлы парохода «America» принесли с собой в эксплоатацию и новые недостатки:

1. Жесткость соединения нижних Т-образных труб, при повышенных нагрузках нередко вызывавшая течи в соединениях этих труб с корпусом котла.

2. Большие габаритные размеры $\frac{V_к}{D} = 30$ *м³/тч*, т. е. больше чем в 2 раза по сравнению с последними типами галерейных котлов.

3. Невозможность во время работы котла наружной очистки поверхностей нагрева от заноса золой.

---

[1] Косвенно это можно подтвердить тем, что Бартол (Bartol B. H.) из 64 описываемых им судовых котлов, имевших распространение в 20—40-х гг., приводит описание 44 котлов галерейного типа.

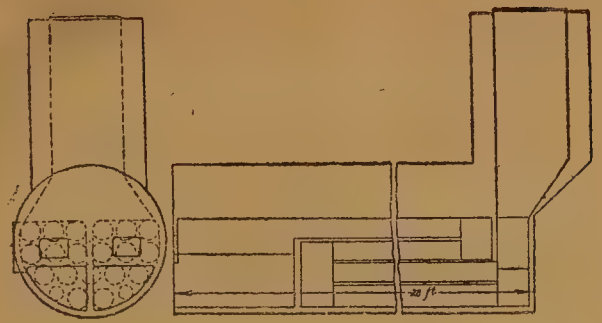


Рис. 37. Котел коммерческого парохода „Empire State".

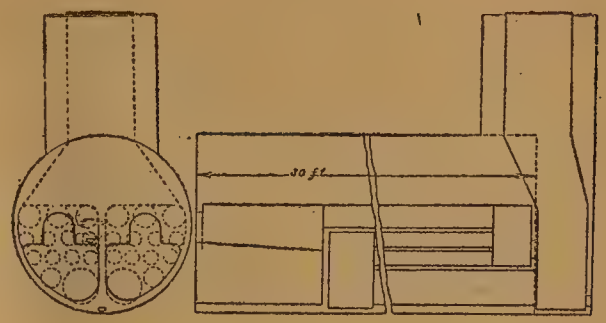


Рис. 38. Котел парохода „Empire State".

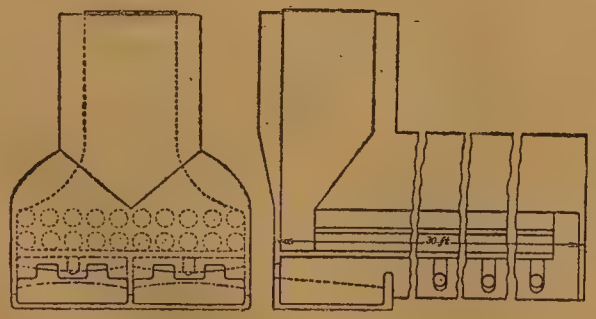


Рис. 39. Котел парохода „America".

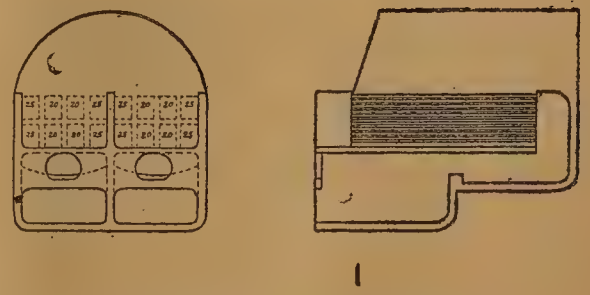


Рис. 40. Котел парохода „John Nelson".

В результате работы котлостроительных заводов над устранением этих недостатков прежде всего отказались от установки Т-образных труб. Кроме того предусмотрели возможность очистки поверхностей нагрева, что дало повышение надежности работы усовершенствованных котлов. Ниже мы приводим один из типов такого котла.

29. Котлы Донхэма и Ко (Dunham & Co) (США)

На рис. 40 показан котел американского речного парохода «John Nelson» водоизмещением в 621 *т*. Основные характеристики его приведены в табл. 4, № 8. Выгодными особенностями этого котла являются:

1. Свободный доступ к дымогарным трубам, позволявший в случае повреждения их не выводить котел из строя более чем на сутки и тут же закупорить (заглушить) концы дефектной трубы с фронта котла, не останавливая его работы.
2. Простота устройства котла.
3. Возможность осмотра трубной доски.
4. Малый диаметр труб, позволявший достигнуть очень малого $\frac{V_к}{H_к} = 0{,}26$.

Габаритные размеры котла, отнесенные к 1 $м^2$ поверхности его нагрева, примерно в 2 раза меньше габаритных размеров лучших в этом отношении из ранее рассмотренных котлов галерейного типа.

5. Помещение дымовой коробки не как обычно в паровом пространстве, а за корпусом котла позволяло уменьшить толщину стенок коробки, так как они не подвергались давлению в котле.

Этот фактор для судовых условий играл важную роль, так как он позволял при прочих равных условиях уменьшить общий вес котла.

Единственным существенным недостатком этого типа котлов является возврат к коробчатой форме, а стало быть, и возврат к болтовым связям котла.

Что же касается $\frac{B}{R}$, $\frac{D}{H_к}$, $\eta_к$, то они, хотя и не могли претендовать на рекордность их величин, но тем не менее являлись вполне удовлетворительными для того времени.

Все это послужило главной причиной широкого распространения данных котлов на судах военного и торгового флота.

В последующих конструкциях этого типа котлов работали над вопросом облегчения изготовления их корпусов. Со временем форма последних становилась более простой.

30. Котлы Мэрри и Хезлхорста (Murry & Hazlehurst) (США)

На рис. 41 показан коробчатый котел коммерческого парохода «Monumental City», тоннажем 768 *т*. Основные характеристики котла даны под № 9, табл. 4.

Анализ эксплоатационных данных таблицы и конструктивной схемы позволяет нам установить следующие преимущества котла:

1. Более простое устройство внутренних топок котла.
2. Довольно высокие $\frac{D}{H_п} = 20$ *кг/м²ч* и к. п. д. $\eta = 55\%$.
3. Малая вероятность заполнения илом пространства между дымогарными трубками и потолком топки создавала меньшую угрозу пе-

регрева и повреждения нижнего ряда дымогарных труб и верхней стенки топки.

4. Помещение дымовой коробки в паровом пространстве позволяло нагревать и осушать пар теплом дымовых газов через стенки дымовой коробки. Это приводило к увеличению мощности машин и к уменьшению вероятности появления гидравлических ударов в паропроводах и машинах.

Но перечисленные здесь преимущества обусловили собой и ряд новых недостатков.

1. Помещение дымовой коробки в паровом пространстве требовало утолщения стенок коробки, а стало быть, и увеличения веса котла.

2. Невозможность осмотра и ремонта пода и смежных боковых стенок котла.

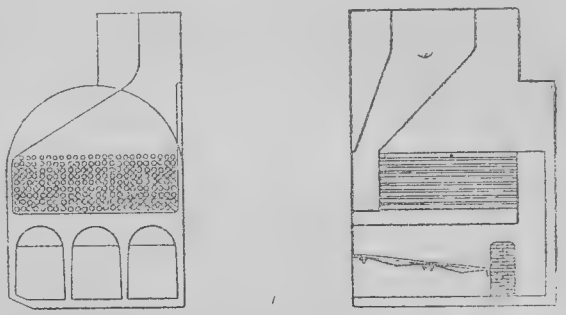


Рис. 41. Котел парохода „Monumental City"

Благодаря простоте устройства и большой надежности в работе, данные котлы получили широкое распространение. Постепенно, вытесняя котлы галерейного типа, они стали основным типом котлов вплоть до 70-х гг. XIX в.

В классической работе Буслея[1], написанной в 80-е гг. XIX в., ведущее место в разборе конструктивных данных уделено коробчатым котлам (табл. 4*b*).

Таблица 4b

№	Название страны	Коробчатые котлы		Овальные котлы		Шотландск. котлы		Пролетные котлы		Локомотивные котлы	
		Число судов	Поверхность нагрева м²	Число судов	Поверхность нагрева м²	Число судов	Суммарная поверхность нагрева м²	Число судов	Суммарная поверхность нагрева м²	Число судов	Суммарная поверхность нагрева м²
1	Германия	16	15 094	—	—	3	352	3	1 037	—	—
2	Англия . .	12	19 064	5	9 372	9	6 572	—	—	1	57
3	Франция .	14	12 500	—	—	8	2 933	—	—	—	—
		42	46 658	5	9 372	20	9 857	3	1 037	1	57

По данным таблицы, поверхность нагрева коробчатых котлов превышает более, чем в 2 раза поверхность нагрева всех остальных типов огнетрубных котлов.

[1] C. Busley. Die Schiffsmaschine. Kiel, т. I, 1886.

Наряду с широким размахом строительства коробчатых паровых котлов с оборотными дымогарными трубками, котлостроительные заводы работали также над освоением постройки оборотных цилиндрических котлов с дымогарными трубами.

Насколько осторожно и медленно продвигалась работа в этом направлении, можно судить по эксплоатационным наблюдениям над нижеописываемым котлом.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБОРОТНЫЕ КОТЛЫ

31. Котлы Мот и Эриз (Mott & Ayres) (США)

На рис. 42 показан котел американского коммерческого парохода «Herman» водоизмещением 1819 *т*.

Котлы этого типа принято называть цилиндрическими оборотными. Их еще называют шотландскими, так как их впервые в мас-

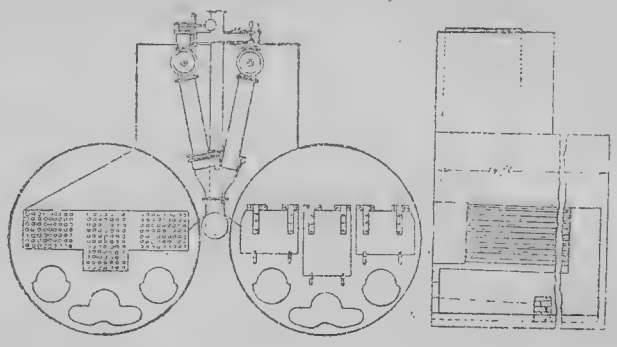


Рис. 42. Котел парохода „Herman".

совом масштабе начали изготовлять в Шотландии. В данных котлах газы движутся вначале вдоль топки, затем вступают в газовую коробку. В последней они поворачиваются на 180° и распределяются по всем дымогарным трубкам. Пройдя их, газы уходят через дымоход в дымовую трубу. Основные характеристики данных котлов приведены в табл. 4, № 10.

Весьма низкая испарительность топлива и низкий к. п. д. в данном котле могут быть объяснены увеличением тепловых потерь от химической неполноты горения из-за малого объема топочных пространств огневой коробки.

Второй основной недостаток — низкое $\frac{D}{H_к}$ — объясняется, вероятно, неосвоенностью производства и эксплоатации котлов данного типа.

Описываемые котлы не получили широкого распространения, хотя и давали большие надежды на выдвижение их в число лучших типов котлов с дымогарными трубками, так как позволяли повышать в них давление пара до 10 *ати* и требовали значительно меньшего числа болтовых связей. Работа по освоению и эксплоатации данных котлов продолжалась, начиная с момента их появления (50-е гг. XIX в.).

ЛОКОМОТИВНЫЕ КОТЛЫ

Наряду с бурным ростом парового флота, в 30—60-х гг. XIX в. очень быстро развивался и паровой железнодорожный транспорт.

Мировая сеть железных дорог за два десятилетия (с 1830 по 1850 гг.) увеличилась с 332 *км* до 38443 *км*.

Особенно большие успехи были достигнуты в постройке паровозных котлов. Вместо прежних жаротрубных цилиндрических котлов Тривитика, постройки 1803 г. (рис. 43), с 1829 г. начали строить усовершенствованные Стефенсоном локомотивные паровозные котлы. По принципу своего устройства они почти не отличаются от современных паровозных котлов (рис. 44).

Успехи в строительстве и эксплоатации паровозных котлов побудили строителей пароходов попытаться применить их в некоторых случаях и для судов.

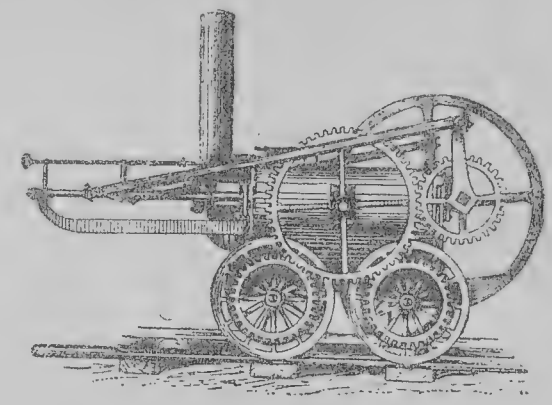


Рис. 43. Паровоз Тривитика.

32. Локомотивные котлы Морриса и Ко (Morris I. P. & Co) (США)

На рис. 45 показан локомотивный котел американского парового парома «Merchant» системы Морриса водоизмещением 245 *т* (характеристики см. в табл. 4, № 11. Часовая паропроизводительность котла не дана).

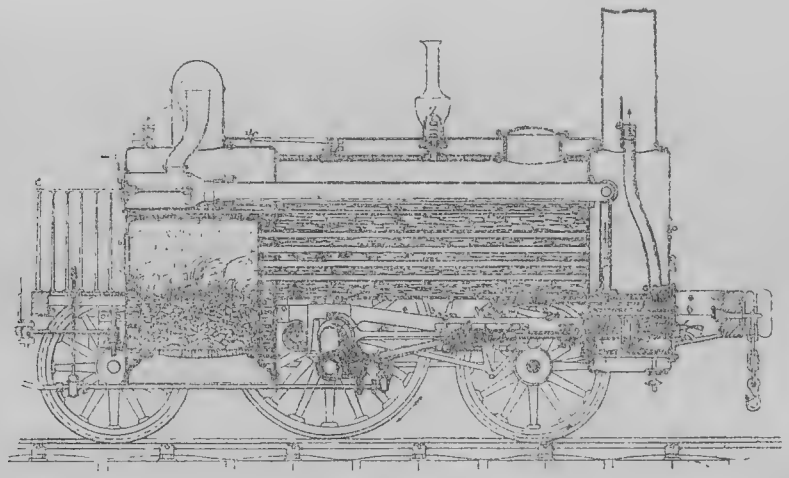


Рис. 44. Паровоз Стефенсона.

Выгодными особенностями локомотивного котла являются:

1. Малые газовые сопротивления, обусловленные только одним поворотом газов на 90°.
2. Небольшая высота котла.
3. Малые габаритные размеры.

Благодаря этим качествам, локомотивные котлы получили применение с 50-х гг. XIX в. на мелкоосадных судах флота, допускающих небольшую высоту кочегарки. Наряду с указанными достоин-

ствами локомотивные котлы имели один очень крупный недостаток. У них часто наблюдалось расстройство соединений передних концов труб с трубной доской, благодаря непосредственному действию на них пламени. Из-за этого недостатка они не получили большого применения даже на мелкоосадных судах.

На паровозах же локомотивные котлы получили широкое распространение вплоть до наших дней. Это объясняется отчасти лучшими условиями парообразования в паровозных котлах. В последних от непрерывного сотрясения паровоза осадки накипи и паровые пузырьки отделяются от стенок котла более интенсивно, чем в стационарных локомотивных котлах. У последних при прочих равных условиях температура стенок котла была меньше, чем в судовых локомотивных котлах. Локомотивные паровозные котлы допускали поэтому более высокую паропроизводительность и одновременно были более долговечными.

33. Общая характеристика судовых огнетрубных котлов

Основным преимуществом всех выше рассмотренных огнетрубных котлов являлся большой водяной объем. В них за счет освобождае-

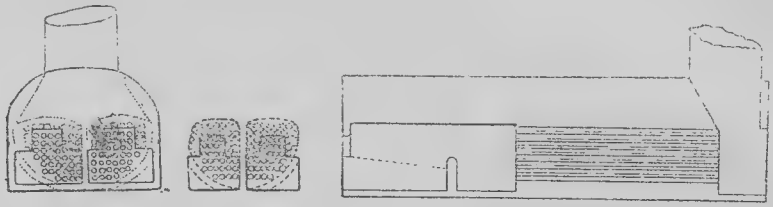


Рис. 45. Котел парового парома „Merchant".

мой теплоты жидкости при уменьшении давления в котле представлялось возможным в несколько раз увеличить паропроизводительность котла на небольшом отрезке времени, и, наоборот, при внезапной остановке машины не было опасности увеличения давления. Вследствие высокой аккумуляционной способности тепла большого объема котловой воды, давление пара росло весьма медленно даже при продолжающемся горении топлива. При полном прекращении потребления пара нормальная работа топки коробчатых котлов могла продолжаться примерно до 20 мин., причем давление в котле поднималось лишь с 2 до 2,4 *ати*.

При остановке машины не было необходимости немедленно прекращать огонь в топке с целью ограничения быстрого роста давления пара. Можно было лишь понизить до минимума интенсивность горения. В судовых условиях это свойство весьма ценно, потому что там часто приходится делать вынужденные и невынужденные остановки машин. В котлах же с малым водяным объемом вслед за прекращением потребления пара наступает быстрое нарастание давления. Если немедленно не прекратить огня в топке, то от чрезмерного повышения давления пара могут произойти повреждения котлов.

Большой водяной объем котлов с дымогарными трубками имеет и свои отрицательные стороны. Например, при повышении давления в котле выше допустимого может произойти взрыв. Последний объясняется накоплением в большом объеме воды весьма значительного количества тепловой энергии.

Вторым недостатком огнетрубных котлов является чрезвычайно медленная разводка в них паров, продолжающаяся до 12 и более часов. Длительная разводка требовалась для обеспечения равномерного прогрева большой массы воды во всех частях котла. В противном случае в заклепочных швах или трубных досках котла могли появиться течи. Этот недостаток котлов давал себя чувствовать с особенной силой на военных кораблях, которые по тактическим условиям требовали быстрейшей разводки паров.

Третий недостаток — трудность очистки дымогарных труб от накипи.

Четвертый — плохое сопротивление дымогарных труб внутреннему давлению. Были случаи, когда от внутреннего давления сплющивались дымогарные трубки. Например на пароходе «С-п»[1] из-за сплющивания концов дымогарных трубок у газовой коробки произошел взрыв котла. В местах сплющивания трубок появились трещины, и вода из котла полилась в газовую и дымовую коробки.

Взрыв был обусловлен не только плохой сопротивляемостью трубок котельному давлению, но и плохой очисткой их от накипи, а также и ветхостью труб, которые были в работе уже 7 лет.

Все вышеизложенные недостатки побудили конструкторов и котлостроительные заводы заняться разработкой котлов с малым водяным объемом, для чего было решено использовать давно известные идеи устройства водотрубных котлов.

ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ

Переход к водотрубным котлам осуществляли очень осторожно. Вначале заменяли только дымогарные трубки кипятильными. Форма же корпуса котла и топки оставалась, как и у большинства котлов с дымогарными трубками, коробчатой.

Даже в самом передовом английском флоте консерватизм мешал введению всяких новинок. Имела место злобная оппозиция против водотрубных котлов. Отголоски этой борьбы ярко выражены в следующих словах из меморандума Фишера Адмиралтейству (см. Records by Admiral of the Fleet Lord Fischer): «Подумайте только, поместили огонь там, где должна быть вода, и воду на место огня». Но все же водотрубные котлы медленно, но прочно, завоевывали себе авторитет.

Для выяснения опытных и эксплоатационных характеристик ниже мы даем описание ряда судовых водотрубных котлов, введенных в эксплоатацию до 60-х гг. XIX в.

34. Котел Мэррика и сына (Merrick & Son) (США)

На рис. 46 показан водотрубный котел американского коммерческого парохода «Osprey» тоннажем 610 *т*. (Эксплоатационные и опытные характеристики котла табл. 4, № 12.)

Рассматриваемый котел по наружной форме напоминает коробчатые котлы. Отличается он от последних лишь тем, что у него вместо горизонтальных дымогарных труб вставлены вертикальные кипятильные трубки. Они снаружи омываются газами, а изнутри водой, тогда как дымогарные трубки омываются, наоборот, газами изнутри, а снаружи водой.

---

[1] Д. Голов. Повреждения на судах. Стр. 114, С.-Петербург, 1897.

Выгодной особенностью этого котла является применение нижнего дутья, позволяющее довести весовое напряжение решетки в среднем до 81,0 *кг/м²ч*. При сжигании антрацита без нижнего дутья максимальное весовое напряжение решетки с большим трудом доводили до 50 *кг/м²ч*. К числу других больших преимуществ этого котла можно отнести:

1. Легкую возможность очистки труб от накипи.
2. Малый объем воды, а следовательно и быстроту разводки (около 4 ч.).
3. Питание котла сконденсированной водой от паровых машин. Использование конденсата для питания котлов следует считать весьма смелым и правильным техническим риском, содействовавшим распространению водотрубных котлов.

Раньше, даже в 50-х гг. XIX в., к питанию котлов конденсатом относились очень недоверчиво и его, как правило, не применяли. В этом же котле был налажен и хороший контроль за водой.

Устраняя недостатки котлов с дымогарными трубами, водотрубный котел принес и свои недостатки:

1. Большую вероятность заноса нижних концов кипятильных труб грязью. Последнее вызывалось употреблением для питания котла, кроме конденсата, около 10% морской воды.
2. Отсутствие продувательных кранов для удаления ила.
3. Невозможность осмотра и подвальцовки нижних концов труб для устранения течи.

Затруднительность доступа к трубам вызывала непрерывные жалобы со стороны машинной команды и привела, наконец, к тому, что строители котлов изменили их первоначальную конструкцию. Все выявленные недостатки были учтены при постройке нижеописываемых котлов.

35. Котлы Рини, Нифай и Ко (Reaney, Neafie & Co) (США)

На рис. 47 показан водотрубный котел американского коммерческого парохода «Union» водоизмещением 515 *т* (табл. 4, № 13). Выгодной особенностью котла парохода «Union» была легкая доступность к осмотру и ремонту всех стен котла, корпуса, а также пода и нижних концов труб.

В этих котлах было возможно обдувать паром от золы кипятильные трубы через задние лазы даже во время работы котла. Через эти же лазы удалялась и зола, выпадающая при повороте газов у задней стенки котла.

В паровом пространстве котла была поставлена пароприемная труба. Пароприемный патрубок отводился в верхнюю часть вертикально стоящего сухопарника. Это мероприятие позволило получать в котле более сухой пар. Уменьшилась опасность образования гидравлических ударов в паропроводах и машинах.

Несмотря на большие преимущества, котел парохода «Union» получил крайне ограниченное распространение из-за неравномерности расширения отдельных частей котла. Это явление часто наблюдалось при увеличении интенсивности парообразования. От неравномерного расширения частей котла в трубках и трубных досках развивались напряжения, которые вызывали течи. Последние удавалось устранять только после вывода котла из строя.

Газы в газоходах котла проходили очень длинный путь: более 6 *м* только в трубной части поверхности нагрева. Кроме того они

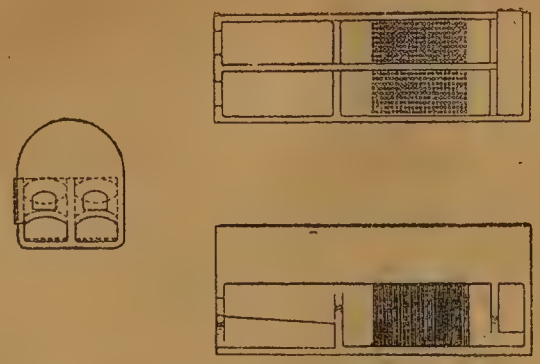


Рис. 46. Котел парохода „Osprey“.

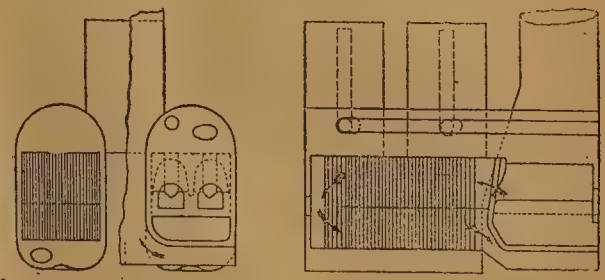


Рис. 47. Котел парохода „Union“.

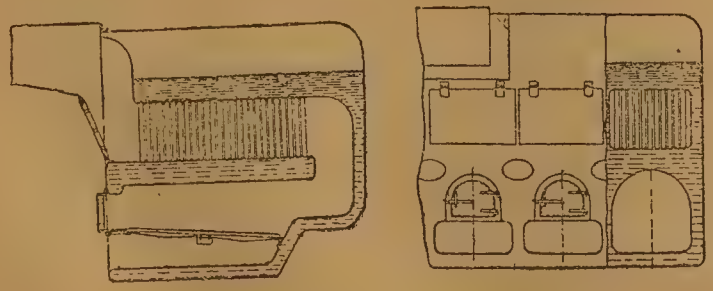


Рис. 48. Котел Мартина.

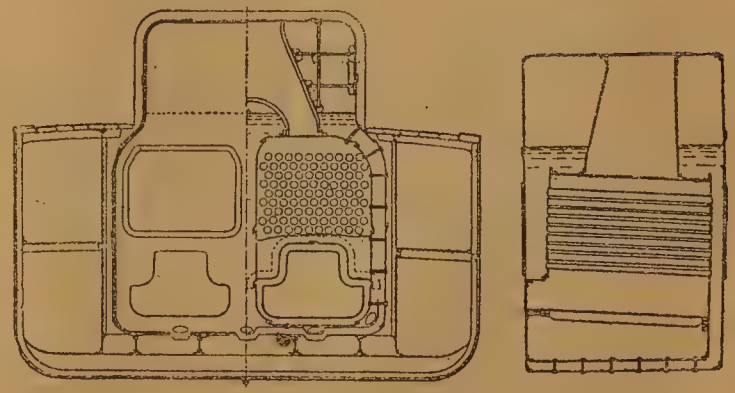


Рис. 49. Котел Шихау.

делали несколько крутых поворотов. Это вызывало большие газовые сопротивления, ограничивающие $\frac{D}{H_к}$ и $\frac{B}{R}$.

Для уменьшения газовых сопротивлений в 50-х гг. XIX в. Мартин предложил изменить конструкцию водотрубных котлов (рис. 48).

36. Котел Мартина (США)

Будучи начальником механической части флота США, Мартин почти на все суда ставил котлы своей системы.

Водотрубный котел Мартина имел несколько внутренних топок. Над последними в коробчатых дымоходах развальцовывались кипятильные трубки.

Котлы Мартина не обладали никакими достоинствами, против выше рассмотренных котлов, за исключением уменьшения газовых сопротивлений. Наоборот, они имели крупный недостаток: частые появления течи в местах развальцовки труб.

Это послужило причиной прекращения их производства к концу 60-х гг.

Попытки применения водотрубных котлов на судах в 50-е гг. XIX в. делались не только в Америке, но и в Европе. Нижеописываемые котлы являются представителями конструкций европейских водотрубных котлов.

37. Котлы Шихау (Германия)

В 1857 г. в Европе появились котлы Шихау (рис. 49), по конструкции представляющие собой почти полную копию котлов Мартина. Отличались они от последних тем, что трубки у котлов Шихау развальцовывались не вертикально, как у котлов Мартина, а горизонтально.

У этих котлов были те же недостатки, что и у котлов Мартина, главным образом, течи; поэтому они довольно скоро начали заменяться другими конструкциями котлов.

В заключение этой главы небезынтересно привести описание котла высокого давления, распространенного в американских стационарных установках, а также применяемого и во флоте в 40—50-х гг. XIX в.

КОТЛЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

38. Жаротрубный котел Йитмэна и Шильда (Yeatman'a & Shield'a) (США)

На рис. 50 приведен котел коммерческого парохода «America» тоннажем 879 *т* (характеристики в табл. 4, № 14).

Из анализа данных таблицы и схемы котла можно сделать следующее заключение о преимуществах его.

Рабочее давление в котле поддерживалось равным 6,3 *ат*.

Сравнительно высокое $\frac{D}{H_к} = 25$ *кг/м²* и большое водяное пространство позволяли вести работу котла при резко изменяющейся нагрузке.

Влажность производимого котлом пара получалась небольшой, так как 1 *м²* зеркала испарения выдавал относительно малое количество пара, и испарение в котле шло спокойно. Котлы были неприхотливы к питательной воде. Они могли питаться даже относительно загрязненной или морской водой, несмотря на то, что давле-

ние в этом котле превышало 6,3 *ати*, т. е. было почти в 2 раза более высшего предела (2,5 *ати*) для котлов, питаемых морской водой.

Размещение топки под котлом давало возможность довести ее объем и площадь колосниковой решетки до желаемых размеров. Это позволяло не перегружать работы решетки и уменьшить тепловые потери от механического недожога топлива.

Большим достоинством рассматриваемых котлов являлась простота внутренней очистки, а также несложный и недорогой ремонт.

Котлы высокого давления были в большом ходу в стационарных установках Америки еще в 80-х гг. XIX в. Однако котлы данного типа имели и ряд существенных недостатков. Главные из них:

1. Размещение топки под котлом вызывало пережог пода котла, так как на поду скоплялось много грязи и накипеобразователей.

2. Обмуровка котла кирпичом увеличивала и без того большой вес его. Ориентировочно можно считать, что все металлические части котла при прочих равных условиях в два раза превышали вес котла с дымогарными трубками.

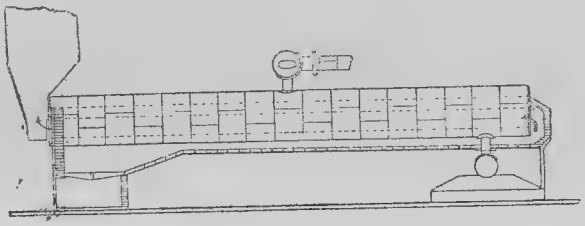


Рис. 50. Котел парохода „America".

3. Котел имел большие габаритные размеры.

По данным таблицы, объем рассматриваемого котла с обмуровкой, отнесенный к 1 $м^2$ поверхности нагрева, составлял 0,83 $м^3/м^2$, т. е. был примерно в 4½ раза больше, чем у предыдущего котла.

4. Поверхность нагрева в котлах не превышала 50 $м^2$.

5. Самый существенный недостаток — чрезмерно низкий к. п. д. котла $\eta_к = 28\%$.

Все перечисленные здесь недостатки послужили главной причиной крайне ограниченного применения котла высокого давления данной конструкции во флоте.

ВЫВОДЫ

На протяжении 20—60 гг. XIX в. в условиях быстрого роста парового флота судовые паровые котлы достигли значительного развития. Соответственно требованиям бурно растущего капиталистического производства к постройке и эксплоатации судовых котлов предъявлялись следующие основные требования:

1) Повышение к. п. д. котлов.
2) Повышение требований к топливу судовых котлов.
3) Повышение паропроизводительности котлов.
4) Повышение давления в котле.
5) Повышение требований к обслуживанию котлов.
6) Повышение квалификации обслуживающего персонала.
7) Сохранение в чистоте внутренних и наружных поверхностей нагрева котла.
8) Простота обслуживания и надежность работы котла.

Основные характеристики котлов, работающих на судах аме

№ по порядку	Наименование судна	Класс судна	Водоизмещение в *т*	Число котлов	Материал для постройки котлов	Главные размеры котла: длина *м* l	ширина *м* b	высота *м* h	Давление в котле *атм* $P_к$	Поверхность нагрева котла $м^2$ $H_н$	Площадь колосниковой решетки $м^2$ R	Отношение поверхности нагрева к площади колосниковой решетки $м^2/м^2$ $\frac{H_к}{R}$
1	„Princeton"	воен.	663	3	железо	6,1	2,13	29	0,91	75	4,16	18
2	„Saranac"	„	1426	3	медь	8,23	3,05	3,05	1,0	159	5,83	27,85
3	„Mississippi"	„	1788	4	„	4,3	4,0	3,6	0,84	125	6,75	18,5
4	„Michigan"	„	518	2	жел.	6,1	2,7	2,6	1,05	78	3,95	19,75
5	„Empire State"	комм.	1570	3	„	8,5	3	3	2,2	163	6,67	24,6
6	„ „	речн.	1551	2	„	9,14	3,6	3,6	1,75	193	7,7	25
7	„America"	„	508	1	„	9,14	4,93	3,6	1,75	128	4,9	26
8	„John Nelson"	„	621	2	„	4,4	3,8	3,4	1,62	217	6,05	36
9	„Monumental City"	комм.	768	2	„	3,34	4,9	3,05	1,05	150	4,75	31,5
10	„Herman"	„	1819	4	„	4,27	3,89	3,89	0,84	196	6,35	30,5
11	„Merchant"	перепр. паром	245	1	„	6,4	2,3	1,83	2,2	105	2,75	38
12	„Osprey"	комм.	610	2	„	6,1	2,5	2,1	1,4	122,5	3,57	34,2
13	„Union"	„	515	2	„	5,79	1,83	3,37	2,2	192,5	2,9	66,4
14	„America"	„	876	7	„	11,0	2,34	1,52	6,3	47	1,47	32

[1] Данные этой и других таблиц, где нет ссылки на специальную литературу, взяты

[2] В данной, как и в последующих таблицах, где не указывается теплотворная спо принималась равной 7000—8000 *кал/кг*, что для топлив, применяемых на большинстве циальной оговорки, количество тепла, затраченного на превращение 1 *кг* воды в пар рабо

лица 4

риканского военного и торгового флота в 20-х и 40-х гг. XIX в. [1]

Сорт угля	Сожжено угля в час под котлом *кг/ч* $B_ч$	Весовое напряжение решетки *кг/м² ч* $\frac{B}{R}$	Испарено воды в час *кг/ч* D	Паронапряжение поверхности нагрева котла *кг/м²ч* $\frac{D}{H_к}$	1 *кг* топлива испарял *кг* воды *кг/кг* $И$	К. п. д. котла % [2] $\eta_к$	Объем котла по габариту $м^3$ $V_к$	Отношение объема котла к поверхности нагрева $м^3/м^2$ $\frac{V_к}{H_к}$	Отношение объема котла к часовой паропроизводит. $м^3/т$ *ч* $\frac{V_к}{D}$	Тип котлов
антрацит	211	51	910	12	4,3	30	37,7	0,5	41,5	лабиринт.
битуминозн.	285	49	2230	14,2	8	55	76,5	0,48	34	галерейн.
„	300	44	1730	13,85	5,77	40	62	0,495	36	„
„	317,5	80	2050	26,2	6,46	45	58,5	0,75	28,5	„
„	843	127	5500	33,5	6,5	45	76,5	0,47	14	„
антрацит	1475	194	8570	45	5,82	40	119	0,617	13,8	„ прим. нижн. дутье
„	700	143	5450	43	7,82	54	162	1,27	30	коробчат. прим. нижн. дутье
„	590	99,65	3540	16,3	6	41	56,7	0,26	16	„
битуминозн.	380	80	3450	20	8	55	50	0,33	14,5	„
„	402,5	63,3	2225	11,4	5,5	38	64,5	0,33	29	цилиндр. огнетрубн.
антрацит	142	51,8	—	—	—	—	27	0,26	—	локомотив. коробчат. нижн.
„	490	81,3	2030	16,5	7	48	32	0,26	15,7	водотрубн. дутье
„	267	94	2000	10,4	7,35	50	35,5	0,183	17,7	овальный водотрубн.
битуминозн.	290	197	1190	25	4,1	28	39	0,83	33	цилиндр. жаротрубн.

из литературы, указанной в примечаниях рассматриваемого параграфа.

собность топлива, для ориентировочного подсчета к. п. д. теплотворная способность нами судов, соответствует действительности. Кроме того, в тех случаях, где мы не делаем спечих параметров ($p_к$, $t_{пер}$), мы принимаем равным примерно 540 *кал/кг*.

1. Повышение к. п. д. котла осуществлялось:

a) борьбой с тепловыми потерями уходящих газов путем уменьшения температуры их и избытка воздуха в отходящих газах;
b) борьбой с химической неполнотой горения посредством равномерного распределения воздуха в слое топлива и отбором односортного по размеру кусков угля;
c) борьбой с тепловыми потерями в окружающую среду путем покрытия изоляционным материалом стенок котла и паропроводов.

2. К топливу, применяемому для отопления судовых паровых котлов, предъявлялись следующие основные требования:

a) высокая теплопроизводительность топлива (примерно 7000 *кал/кг*);
b) минимум балласта (влага и зола);
c) отсутствие самовозгорания;
d) однородность угля по размерам кусков.

3. Повышение паропроизводительности котлов осуществлялось:

а) увеличением поверхности нагрева котла;
б) увеличением парового напряжения поверхностей нагрева котла и весового напряжения решетки за счет применения нижнего дутья.

4. Повышение давления в котле осуществлялось:

a) увеличением числа внутренних связей котла;
b) утолщением стенок котла;
c) заменой дымогарных трубок прямоугольной формы трубками цилиндрической формы;
d) заменой коробчатой формы корпусов котлов овальной и цилиндрической.

5. Основные требования к персоналу, обслуживающему котлы, сводились к следующему:

a) непрерывное наблюдение за уровнем воды в котле;
b) поддерживание постоянного давления в котле;
c) умение подпитывать котлы в соответствии с расходом пара;
d) своевременная очистка внутренних и наружных поверхностей нагрева котла от золы и накипи;
e) своевременная чистка топок;
f) знание мер, могущих предупредить взрыв котла, в последовательности их применения;
f) умение содержать в исправности все механизмы, арматуру и приборы котла (питательные насосы, клапан, предохранительные клапаны, водомерные стекла, манометры и др.).

6. Повышение квалификации персонала, обслуживающего котлы, проводилось:

a) путем предварительного обучения его основным правилам эксплоатации паровых котлов;
b) изданием печатных инструкций.

7. Поддержание в чистоте наружных и внутренних поверхностей нагрева осуществлялось путем:

а) своевременной очистки их от золы и шлака, либо путем обдувки их паром во время работы котла, либо вручную во время остановки котла;

b) содержания в чистоте внутренних поверхностей нагрева: во-первых, периодической очисткой поверхностей нагрева от накипи, во-вторых, своевременным нижним и верхним продуванием котла и, в-третьих, поддержанием давления в котле не выше 3,5 *ата*, при котором начинается интенсивное выпадение из воды накипеобразователей.

8. Надежность работы и простота устройства котла достигались:

а) конструкцией котла, допускающей производство осмотра всех частей его и их соединений как с внутренней, так и с наружной стороны;

b) требованием от конструкции котла редких, несложных и недорогих ремонтов.

На протяжении 20—60-х гг. XIX в. в области постройки и эксплоатации паровых котлов были сделаны большие для того времени достижения, а именно:

1. Замена: а) лабиринтных котлов котлами галерейного типа; б) дымогарных труб прямоугольного сечения трубами цилиндрической формы; в) коробчатой формы корпуса котлов цилиндрической.
2. Увеличение поверхности нагрева котла до 220 $м^2$.
3. Применение нижнего дутья.
4. Повышение паропроизводительности котла до 8500 *кг/час* (против 500 *кг/час* у первых судовых котлов).
5. Повышение паронапряжения поверхностей нагрева до 45 $кг/м^2ч$.
6. Повышение весового напряжения решетки до 200 $кг/м^2ч$.
7. Увеличение к. п. д. котла с 30 до 55%.
8. Уменьшение объема, занимаемого котлом, с 41 до 14 $м^3$ на 1 *т* производимого в час пара.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА КО II ГЛАВЕ

1. Bartol B. H. A treatise on the marine boilers of the Unit. St. Philadelphia, 1851.
2. Bourne John. Treatise on the steam engine in its applications to mines, mills, steam navigation and railways. London, 1849.
3. Busley „V. D. I." 1896.
4. Bourne J. The modern practice of boiler engineering. Containing observations on the construction of steam boilers and upon furnaces used for smokep revention, with a chapter on explosions. London, 1856.
5. Bourne John. A treatise on the steam-engine in its various applications to mines, mills, steam navigation, railways and agriculture with theoretical investigations respecting the motive power of heat and the proper proportions of steam-engines, elaborate tables of the right dimensions of every part and practical instructions. London, 1861.
6. Bourne J. A catechism of the steam engine in its various applications to mines, mills, steam navigation, railways and agriculture. A new edition. London, 1857.
7. Buchanan R. A practical treatise on propelling vessels by steam. Glasgow, 1816.
8. Evers H. Steam and the steam engine, land, marine and locomotive. 3 ed., London and Glasgow, 1878.
9. Gordon W. The economy of the marine steam-engine, with suggestions for its improvement and notes upon various subjects connected with steam. London, 1845.
10. Hamelin. Catechisme du marin et du mécanicien à vapeur ou traite des machines à vapeur de leur montage, de leur conduite, de la réparation de leurs avaries. Paris, 1857.

11. Hodge C. E. The steam engine, its origin and gradual improvement from the time of Hero to the present day; as adopted to manufactures, locomotion and navigation, with numerous explanatory woodcuts and a volume, containing forty — eight plates. New-York, 1840.

12. Iscberwood B. F. Engineering precedents for steam machinery; embracing the performances of steam ships, experiments with propelling instruments, condensars, boilers etc, accompanied by analyses of the same, the whole being original matteer and arranged in the most practical and useful manner for engineers. Vol. 1 a. 11, New-York, 1859.

13. Lardner D. Steam and its uses including the steam engine, the locomotive and steam navigation. London, 1856.

14. Lardner D. The steam engine explained and illustrated. London, 1836.

15. Ledieu A. Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation. Avec atlas. Paris, 1864.

16. Main Th. and Brown Th. The marine steam engine. Designed chiefly for the use of the officers of Her Majesty's Navy. London, 1849.

17. Mathias E. Handbuch für den Schiffsmaschinen-Dienst. B. 1, Triest, 1870.

18. Murray R. Rudimentary treatise on marine engines and steam vessels, together with practical remarks on the screw and propelling power as used in the Royal and merchant navy. 2 ed., London, 1852.

19. Muspratt. Theoretische, praktische und analytische Chemie. Vorgesetzt von B. Kerl. Braunschweig, 1870.

20. Ortolan A. Code de l'acheteur, du vendeur et du conducteur des machines á vapeur. Paris, 1861.

21. Ortolan A. Traité elementaire des machines à vapeur marines, rédigé d'après le programme du concours pour le brevet de capitaine au long cours et de mairte au cabotage. Texte et atlas. Paris, 1857—1858.

22. Rankine W. J. A manual of the steam engine and other prime movers. 1859.

23. Robinson R. S. The nautical steam engine. London, 1859.

24. Stumper. „Wärme", № 18—20, 1934.

25. Stock. Steam boilers, their design, construction and management. New-York, 1881.

26. Tredgold Th. The steam engine, comprising an account of its invention and progressive improvement; with an investigation of its principles and the proportions of its parts for efficiency and strength; detailing also its application to navigation, mining, impelling machines etc., and the results collected in numerous tables for practical use, London, 1827.

27. Tredgold. Appendices A.B.C.D.E.F.G. Completing the volume in continuation of the new edit. of Tredgold on „The steam engine and on steam navigation; comprising the works of the eminent engineers and naval architects;" together with the text in medium quarto uniform with Tredgold's work. London, 1844.

28. Tremtsuck C, A. Recueil des décrets, ordonnances, insctructions, décisions réglementaires sur les machines à feu et sur les bateaux à vapeur. Paris, 1842.

29. Williams, W. J. A steam manual for the British navy. Portsea, 1843.

Русская литература ко II главе

1. К. Буслей. Судовые механизмы. Ч. I. Котлы и вспомогательные механизмы. Перевод с немецкого с сокращениями Пно-Ульского Г. и К. Брандта. СПБ, 1889 г.

2. Жанвие. Правила и руководство для начальника-механика и для управляющего машиною на пароходе. Перевод с французского Глазенапа. СПБ, 1837 г.

3. Крузенштер. О морской паровой машине, о ее силе и действии. Перевод с английского. СПБ. 1844.

4. Карелин. О русских паровых машинах и сельских мельницах. СПБ, 1848 г.

5. Голов Д. Повреждения на судах. Т. I. С.-Петербург, 1897 г.

ГЛАВА III

СУДОВЫЕ ОГНЕТРУБНЫЕ КОТЛЫ 70—90-х ГГ. XIX В.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТА В 70—90-х ГГ. XIX В. [1]

С 70-х годов XIX в. темпы развития капиталистической техники возрастают. Начинается еще более, чем прежде, бурный рост производительных сил капиталистического общества. Развиваются усиленно промышленность, торговля и транспорт. Растут требования к увеличению тоннажа и быстроходности судов.

Для характеристики быстрого роста мировой промышленности в XIX в. показателен, например, рост производства чугуна (табл. 5).

Таблица 5

Мировое производство чугуна в тысячах *т* [2]

Годы	Количество чугуна	Годы	Количество чугуна
1806	760	1860	7 424
1823	1 202	1861	7 287
1834	2 016	1864	9 522
1842	2 658	1867	10 013
1848	4 246	1870	12 209
1850	5 817	1880	18 327
1854	6 036	1890	27 627
1856	6 950	1899	40 585

Если в 1860 г. мировое производство чугуна составляло 7424 тыс. *т*, то в 1890 г. оно поднялось до 27 627 тыс. *т*, т. е. увеличилось почти в 4 раза. Развитие промышленности вызывало качественный и количественный рост паровых котлов и машин, все более широко внедряющихся во все отрасли производства.

Мощность паровых машин во Франции за 30 лет (с 1871 по 1901 г.) поднялась с 316 000 *л. с.* до 1 907 730 [3] *л. с.* (см. табл. 6), т. е. увеличилась в 6 раз.

---

[1] Beck L. Geschichte des Eisens. T. V, стр. 896, 1903.
[2] Данилевский. Очерки по истории техники. Стр. 164, 1934.
[3] Matschoss. Die Entwicklung der Dampfmaschine. Berlin. 1908.

Таблица 6

Рост паровых машин в промышленности Франции по годам

Годы	Число паровых машин	Суммарная мощность в *л. с.*
1841	2 810	37 000
1851	5 672	71 000
1861	15 805	191 000
1871	26 146	316 000
1881	44 410	516 000
1891	58 067	916 000
1901	75 866	1 907 730

Распространение паровых машин и котлов вообще и в частности применяемых на военных и коммерческих судах давало толчок быстрейшему росту промышленности, в особенности металлургии. Увеличился спрос на железо, чугун и медь. Для возможности повышения давления пара в котле и получения большей надежности в работе его повышаются требования к качеству выделываемого железа и стали. Для удовлетворения усиленного спроса на металл в средине XIX в. изобретаются новые способы переработки чугуна в железо и сталь (бессемеровский — 1855 г., сименс-мартеновский — 1864 г.), более совершенные, чем старое пудлингование, превратившееся к 70-м гг. в тормоз для дальнейшего развития металлургии. Усиленному росту металлургии способствовали также войны, требовавшие громадных количеств металла на вооружение и в частности на артиллерию. Исходным пунктом работ Бессемера было как-раз получение литой стали для производства пушек.

Мировое ежегодное производство стали поднялось с 1870 по 1900 г. с 673 343 до 27 859 882 *т*, т. е. более чем в сорок раз (табл. 7).

Таблица 7

Мировое производство стали по годам в *т*

1865 г.	392 365	1880 г.	4 192 008
1870 г.	673 343	1890 г.	11 631 632
1875 г.	1 911 392	1900 г.	27 859 882

Вместе с ростом промышленности росла необходимость увеличения водного и железнодорожного транспорта.

Только одного хлопка было перевезено из Америки в Англию

в 1824 г.	1844 г.	1861 г.	1880 г.	1900 г.
78 000 *т*	181 437 *т*	680 390 *т*	6 430 *т*	7 000 *т*

Потребность в росте судов с каждым годом повышалась настолько, что технические средства капитализма даже не могли ее покрыть постройкой новых судов парового флота. В перевозках грузов все еще большую роль продолжал играть парусный флот. Так, например, перевезено грузов в тыс. *т* (табл. 8):

Таблица 8

№ по пор.	Наименование флотов	1851 г.		1871 г.	
		количество в тыс. *т*	%	количество в тыс. *т*	в % по сравнению с 1851 г.
1	Парусный флот	9425	100	15260	161
2	Паровой флот	329	100	2444	745
3	Паровой флот в проц. от парусного флота	—	3,5	—	16

Данные таблицы показывают нам, насколько слаб был тогда еще паровой флот. Но цифры одновременно говорят и об усиленном росте именно парового флота в сравнении с парусным (745% против 161%).

Вместе с ростом парового флота росла и необходимость ускорения перевозки грузов. Увеличение скорости движения пароходов часто подстегивалось конкуренцией парового водного транспорта с железнодорожным.

Еще в конце 30-х годов XIX в., конкурируя с железнодорожным транспортом, речные пароходы США, например «New World», проходили со средней скоростью в 17—17,5 узла расстояние в 120 миль между гг. Нью-Йорком и Альбани.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЙКЕ И ЭКСПЛОАТАЦИИ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX в.

Пароходовладельцы для увеличения своих прибылей поставили перед конструкторами и эксплоатационным персоналом судовых установок задачи настоятельной борьбы за экономию топлива и повышение мощности котлов.

Для удовлетворения этих требований велась работа по повышению давления пара в котле, перегреву пара, замене естественной тяги искусственной, а также по применению горячего дутья.

Усовершенствовались в этом направлении преимущественно коробчатые огнетрубные котлы, занявшие в третьей четверти XIX в. почти монопольное место по применению их на судах. Они были просты в обслуживании и давали наибольшие $\frac{D}{H_к}$, $D_ч$, $\frac{D}{G_к}$ и др.

К концу 70-х гг. XIX в. коробчатые котлы по особенностям их конструкции, главным образом из-за плоскостенности, не могли удовлетворить требований быстро развивающегося флота в части дальнейшего повышения давления, уменьшения веса и габаритных размеров.

Для совершенствования и выбора нужной конструкции котлов велась большая экспериментальная работа над коробчатыми, пролетными, локомотивными и цилиндрическими котлами. Последние, сохраняя в себе ряд преимуществ коробчатых котлов, по конструктивным особенностям (цилиндрическая форма корпусов) могли дать дальнейшее повышение $P_к$ и снижение $\frac{G_к}{D}$ и $\frac{V_к}{D}$. В результате усовершен-

ствования топок и значительного улучшения качества котлостроительных материалов, цилиндрические котлы в 80-х гг. XIX в. заняли монопольное место по распространению их на судах военного и коммерческого флота.

Одновременно велась большая работа по приспособлению пролетных и локомотивных котлов для работы их на легких военных судах (миноносцы, легкие крейсера и др.). Основной упор, в соответствии с особенностями этих судов, был направлен на достижение максимальных паронапряжений и минимальных веса и габаритных размеров котлов.

Пролетные и локомотивные котлы все же не получили большого успеха на военных судах, так как достигнутые в них рекордные для конца XIX в. $\frac{D}{H_к}$, $\frac{B}{R}$, $\frac{V}{D}$ и $\frac{G}{D}$ могли поддерживаться только в течение весьма короткого промежутка времени (1—2 ч.). В связи с этим в 90-х гг. XIX в. пролетные и локомотивные котлы начали везде заменяться водотрубными котлами.

В дальнейшем на разборе характерных для данной эпохи конструкций огнетрубных котлов будет показано, как постепенно, шаг за шагом, путем внимательного изучения и изживания отдельных недостатков, вырабатывалась нужная новой эпохе конструкция котла.

39. Интенсификация работы судовых котлов

Достижение значительных по тому времени скоростей было возможно лишь при условии увеличения паропроизводительности паровых котлов и мощности машин. Нужно было или улучшить конструкцию котлов и машин, или сильно форсировать их работу.

Для повышения паропроизводительности работы котла было решено использовать уже давно известный способ подвода в слой топлива сжатого воздуха [1].

Американцы для большей компактности применяли не воздуходувные меха, а центробежные вентиляторы. Посредством последних воздух, необходимый для горения, очень интенсивно подводился в слой, отчего весовое напряжение решетки повышалось до 200 *кг/м²ч* против примерно 60 *кг/м²ч* при естественной тяге.

Весовое паронапряжение поверхности нагрева доходило до неслыханных для того времени размеров в 45 *кг/м²ч*.

Благодаря применению нижнего дутья, американскому речному флоту некоторое время удавалось конкурировать с железнодорожным транспортом.

Весьма высокие паронапряжения вызывали уменьшение к. п. д. котла, главным образом за счет потерь с уходящими газами. Применение таких больших форсировок работы котлов посредством нижнего дутья дальше американского речного флота почти не шло.

40. Повышение давления пара в котле

Морские пароходы даже в 50-х гг. XIX в. проходили расстояние из Ливерпуля до Нью-Йорка (при скорости 9,5 узла) в 13 дней. Такие скорости движения морских пароходов были недостаточны для

[1] См. работу Кариона (Heronis Alexandrini. Buch von Luft und Künsten. Frankfurt, 1688), где имеется указание о применении воздуходувных мехов и парового дутья при обработке металла. О возможности использования воздуходувных мехов и парового дутья сообщает и Леонардо да-Винчи (F. M. Feldhaus. Leonardo der Techniker und Erfinder, 1922).

капиталистического производства. Пока не появились новые конструкции котлов и машин для увеличения скорости движения пароходов и полезной их грузоподъемности, необходимо было искать какие-то другие способы увеличения мощности машин.

В частности еще в 60-х гг. XIX в. были сделаны попытки перейти на постройку и эксплоатацию котлов и машин повышенного давления пара. Предполагалось, что это средство позволит увеличить мощность машины, а стало быть, и скорость движения пароходов. Но тогда эти попытки не увенчались успехом из-за недостаточного развития машиностроения, из-за неумения бороться с накипью и из-за ряда других причин.

41. Применение перегретого пара

Наряду с применением нижнего дутья и повышением давления пара в судовых котлах в середине XIX в. были сделаны попытки применить перегретый пар[1]. Идея применения перегретого пара, как и многие другие технические идеи, была выдвинута практикой.

Как уже упоминалось выше, котлы с малым паровым пространством почти всегда давали весьма влажный пар. Увлекаемые паром частицы соленой котловой воды попадали на поверхности цилиндров и золотников машин и постепенно их разрушали.

Для уменьшения разъедания паровой машины были предложены и введены в эксплоатацию пароосушительные приборы. Пароводяная смесь, проходя этот прибор, меняла свою скорость по величине и направлению, отчего водяные частицы, выпадающие из пара, стекали по трубе в специальный горшок. Такое устройство неплохо осушало пар. Однако, этот прибор имел тот существенный недостаток, что в нем понижалось давление пара.

Чтобы избежать значительного падения давления пара при его осушке, было предложено производить осушение пара за счет теплоты уходящих газов. Одним из первых такое предложение дал в 1789 г. Гумпрей. Практическое применение перегретого пара началось примерно с 1828 г. Вначале осушение и перегрев пара конструктивно осуществлялось так: помещали паровую трубу в пространство дымохода. При помощи теплоты уходящих дымовых газов испарялись частицы воды, увлекаемые паром.

В зависимости от величины поверхности паровой трубы, обогреваемой газами, изменялась и степень осушения пара. Когда поверхность трубы и температура омывающих ее газов были относительно велики, то пар не только полностью осушался, но даже и перегревался.

Применение такого способа осушения и даже перегрева пара позволило увеличить и к. п. д. котла за счет снижения пароосушителем температуры уходящих газов. Так родился пароперегреватель.

Первый надежно работающий пароперегреватель для судовых котлов был сконструирован начальником механической части флота США Мартином в 1854 г. Он был установлен и эксплоатировался на одном гудзоновском пароходе.

В 1856 г. в Кольмаре Гирн провел свои опыты над пароперегревателем и паровой машиной, работающей перегретым паром.

---

[1] Busley C. Die Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten. Berlin, 1892.

В 1857 г. в Англии Пенн впервые установил перегреватели на судовых котлах. Но все это были еще только опыты.

Всеобщее введение пароперегревателей на коммерческих и военных пароходах началось только в 1889 г. после исследования, проведенного Тейлором и Фарадеем, которые доказали, что применение перегретого пара неопасно.

В ранних конструкциях перегреватель выполнялся по указанной на рис. 51 схеме.

Вертикальные пароперегреватели помещались в основании дымохода (рис. 51). Устройство вертикальных пароперегревателей было весьма просто. Они состояли из металлического цилиндра, в основании которого были развальцованы железные цилиндрические трубки.

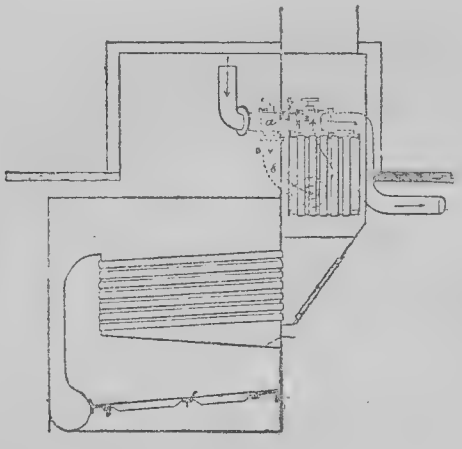


Рис. 51. Коробчатый котел с вертикальным пароперегревателем.

Образующийся в котле пар входил в нижнюю часть перегревателя, затем поднимался вверх. Во время пути пар вначале осушался и затем перегревался газами, протекающими внутри труб перегревателя. Из верхней части пароперегревателя пар отводился по паропроводу к паровой машине. Передача тепла происходила здесь так же, как и в котле, с той лишь разницей, что в рассматриваемом перегревателе наружная поверхность труб омывалась не котловой водой, а паром, подлежащим осушению.

Поверхность нагрева пароперегревателей, как правило, делалась небольшой, и поэтому пар перегревался слегка, а иногда даже только осушался, чем обычно и довольствовались, так как при этом несколько улучшались условия работы машины и повышались ее мощность и к. п. д.

Эксплоатация перегревателей рассматриваемой конструкции вскоре выявила их недостатки:

1. Малый перегрев.
2. Кропотливость ухода за перегревателем.
3. Невозможность очистки трубок пароперегревателя от накипи, выделенной из частиц котловой воды в паре.
4. Громоздкость и тяжеловесность корпуса перегревателя.

Выявленные недостатки вертикальных пароперегревателей послужили причиной того, что от них почти отказались. На многих, в особенности военных судах начали ставить горизонтальные пароперегреватели двух типов: отдельные для каждого котла и общие.

Первые помещались в дымовой коробке (рис. 52). В данных перегревателях вместо одного корпуса, в котором крепились трубки перегревателя, были устроены 2 щелевые коробки, соединяемые между собой пучком овальных труб, концы которых имели круглое сечение.

Чтобы обеспечить свободный сток воде, получающейся при остановке котла, нижняя поверхность трубок делалась цилиндрической по всей их длине.

Трубки устанавливались под небольшим уклоном к горизонту.

Наружная часть трубок перегревателя омывалась газами, а внутренняя — паром. Пар поступал в перегреватель по одной камере, а выходил из него по другой. В одной из камер было прорезано от 4 до 6 отверстий, через которые можно было вытаскивать поврежденные трубки и вставлять вместо них новые. Во время работы отверстия закрывались крышками и затягивались при помощи болтов.

Система установки перегревателя у каждого котла хороша тем, что перегрев пара в данном котле не зависит от работы других котлов.

По этой системе часто удается скомпановать перегреватель ниже ватерлинии, что очень важно для военных кораблей, так как они

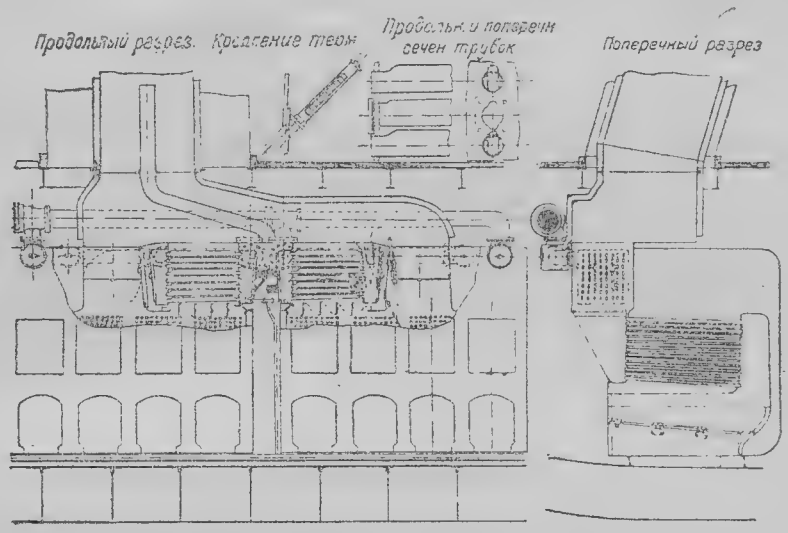


Рис. 52. Коробчатые котлы с индивидуальными горизонтальными пароперегревателями.

в этом случае лучше защищены от попадания неприятельских снарядов.

Общие перегреватели ставились по одному на два смежных котла (рис. 53). Если требовался перегрев пара, то котлы работали попарно, т. е. работающих котлов должно было быть 2—4—6—8.

Общий перегреватель редко удается поместить ниже ватерлинии, и, следовательно, только на броненосных крейсерах они более были защищены от попадания в них снарядов.

Для увеличения температуры перегрева иногда увеличивали поверхность перегревателя и удлиняли путь пара в нем. Достигалось это разделением фронтовой камеры перегревателя на две части горизонтальной переборкой. Впуская пар только в одну часть камеры, тем самым заставляли его пройти последовательно два пучка труб и возвратиться в другую часть той же камеры.

Выгодной особенностью горизонтальных перегревателей как общих, так и индивидуальных, является расположение трубок перпендикулярно к потоку газов, отчего увеличивается теплопередача.

В этих перегревателях уже можно было осуществить и регулировку перегрева пара вплоть до выключения перегревателя из работы поворотом дымовых заслонок.

При показанном на рис. 53 положении заслонок перегреватель омывается всеми газами, стало быть, температура перегрева будет наивысшей. Если же хотят уменьшить температуру перегретого пара, то приоткрывают большую заслонку *k*, и тогда часть газов идет мимо перегревателя.

Меняя положение заслонок, пропускающих газы через перегреватель и мимо него, можно отрегулировать температуру пара до желаемой величины, но не выше получаемой при пропускании всех газов через перегреватель. Иногда для регулирования температуры перегретого пара практиковали разбавление его влажным паром из котла.

Основная польза применения перегретого пара заключается в увеличении мощности машин и в уменьшении расхода топлива на 1 *и. л. с. ч.*

По данным опытов Гирна (Hirn) [1], при перегреве пара на 90° Ц получалась экономия топлива на 27,5%. Опыты, проведенные Мартином (Martin) и Пенном (Penn), показали, что при давлении пара в 1,4 *ати* и перегреве его на 60° Ц расход топлива на 1 *и. л. с. ч* уменьшился на 20%. Сеннет [2] указывает, что на некоторых пароходах, например «Peninsular» и «Oriental», экономия топлива вследствие применения перегретого пара получалась от 21 до 34% [3]. Ранкин (Rankin) теоретически доказал, что при перегреве пара на 80° Ц должна получиться экономия топлива на 21% [4].

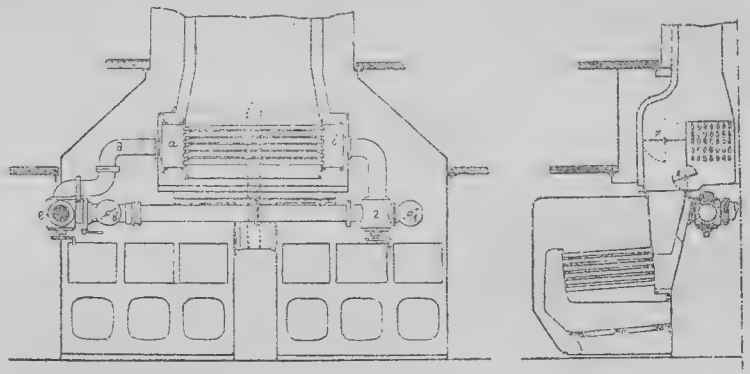


Рис. 53. Коробчатые котлы с общими горизонтальными пароперегревателями.

Такая большая экономия топлива получалась лишь при давлении пара до 2 *ати* и температуре перегрева его не выше 175° Ц.

Попытка применить перегрев при более повышенных давлениях пара от 4 до 6 *ати*, считавшихся в 80-х гг. нормальными, окончилась в то время неудачей. Температура насыщения пара при этих давлениях приближалась к пределу, при котором в то время возможна была безопасная работа машин перегретым паром.

При нагреве пара выше 175° Ц употреблявшиеся в то время неминеральные смазочные вещества в цилиндрах и золотниках коксовались

---

[1] См. VDI, Heft IV, 1866.
[2] Sennet. The Marine Steam engine. Стр. 196, 1885.
[3] Schwarz-Fleming. Die Kessel Abtheilung auf Dampfschiffen. Стр. 167, 1873.
[4] Rankine. A manual of the steam engine. Стр. 437, 1873.

и переставали действовать как смазка. Золотники и поршни работали сухими, что приводило к быстрому изнашиванию трущихся поверхностей и вызывало утечку пара.

Весьма быстро изнашивалась и набивка в сальниках, отчего происходили повреждения машин.

Все это послужило причиной отказа от употребления в то время перегревателей при давлении в 4—6 *ати*. Только на судовых котлах английского флота перегреватели ставились даже при давлении пара в 4 *ати*.

Как показали пробные плавания, паросиловая установка при работе на перегретом паре давала большие к. п. д. в сравнении с работой при выключенном пароперегревателе. Но наряду с этим эксплоатационные наблюдения над работой паросиловых установок показали, что экономия в стоимости топлива от введения перегрева пара не оправдывала стоимости постановки и содержания в исправности перегревателей и машин.

Даже при давлении пара до 2 *ати*, при котором применение перегретого пара давало большую экономию, перегреватели часто портились. Дело в том, что вначале трубки перегревателя ставились чугунными. Они показали малую надежность в работе. От температурных напряжений в них часто появлялись трещины. Чугунные трубки стали заменять железными, но и они, несмотря на все предосторожности, быстро разрушались от ржавления. Тогда начали применять трубки из красной меди, которые с повышением температуры изменяли свою прочность. Пришлось овальную форму трубок заменить круглой, так как при последней трубки лучше сопротивляются внутреннему давлению. Но и перегреватели, сделанные из медных труб, приносили немало хлопот и требовали периодического ремонта.

Между тем, к паросиловым установкам военных судов предъявлялось требование работы без ремонта силами порта не менее 4 лет.

В то время практиковались четырехгодичные заграничные плавания, и вынужденная остановка военного корабля в гавани могла быть использована иностранцами для изучения механизмов и боевых средств корабля.

Поэтому в военном флоте перегреватели стали постепенно вытесняться, особенно в тех случаях, когда применялось повышенное давление пара.

Совсем иначе дело обстояло в торговом флоте. После каждого рейса парохода предоставлялась возможность осмотреть в своем порту как его машины, так котлы и перегреватели и, если надо, то и отремонтировать их.

В котлах, производящих пар от 4 до 6 *ати*, перегреватели часто предназначались лишь для осушения пара, что, безусловно, оправдывало себя, и на судовых котлах коммерческого флота пароперегреватели еще некоторое время применялись в эксплоатации.

42. Естественная тяга

Перед пароходовладельцами с большой остротой встал вопрос об изыскании новых, более эффективных способов повышения мощности судовых силовых установок и уменьшения их веса и габаритных размеров.

Поставленная задача была осуществлена путем применения уже давно известного способа форсировки работы котла искусственной тягой.

До 60-х гг. XIX в. в судовых установках в основном использовалась естественная тяга — подвод воздуха, необходимого для горения топлива, и отвод образовавшихся при горении дымовых газов при помощи дымовой трубы.

Естественная тяга получается вследствие разности весов горячего столба газов в котле и дымовой трубе и холодного наружного столба воздуха. Тяжелый наружный воздух, поступая в топку котла, оказывает давление на горячие легкие дымовые газы и прогоняет их по дымовой трубе; благодаря этому и образуется естественная тяга. Как показали эксплоатационные наблюдения, сила тяги повышается с увеличением высоты дымовой трубы и температуры уходящих газов. Было установлено, что сила тяги зависит также от температуры и влажности наружного воздуха, от барометрического давления и от силы и направления ветра. Так, например, летом сила тяги всегда слабее, чем зимой. Естественная тяга надежна в работе, не требует расхода энергии, и ее устройство почти не нуждается в ремонте.

До той поры, пока не появилась необходимость повышения интенсивности работы котлов, естественная тяга неплохо справлялась со своими задачами, но когда с 60-х гг. XIX в. для повышения к. п. д. силовой установки стали устанавливать пароперегреватели, иными словами, когда увеличилось сопротивление движению газов в газоходах, тогда естественная тяга стала узким местом в котельной установке. Старания эксплоатационного персонала хотя сколько-нибудь повысить нагрузку котла при естественной тяге имели мало успеха.

Повышение естественной тяги во вновь строящихся котлах за счет увеличения высоты дымовой трубы и температуры уходящих газов было невозможно. Высота дымовой трубы на судах должна иметь ограниченную величину, вследствие своей непрочности и тяжести. На военных же судах высокая труба представляет хорошую цель для неприятеля. Итти по пути повышения температуры уходящих газов было невыгодно ввиду значительного увеличения потерь с уходящими газами.

Все это привело к необходимости полной или периодической замены естественной тяги тягой искусственной.

43. Искусственная тяга

Мысль об искусственной тяге была когда-то брошена Героном и затем Леонардо да-Винчи, но только в начале XIX в. искусственная тяга была осуществлена американцами в судовых котлах.

Опыт Америки был использован и получил широкое применение в других странах Европы только во второй половине XIX в.

44. Искусственная тяга посредством парового форсуна

Вначале искусственная тяга осуществлялась путем парового форсуна, который был, вероятно, позаимствован у паровозных котлов (рис. 44).

Стефенсон добился высоких форсировок своего паровоза главным образом потому, что он направлял пар, отработанный в машине, через паровую трубу в основание дымовой трубы. Пар, выходя с большой скоростью, интенсивно засасывал газы и выталкивал их в атмосферу, отчего значительно повышалась форсировка котла. По принципиальной схеме паровой форсун имел такое же устройство (рис. 54). Разница заключалась лишь в том, что для парового форсуна в большинстве случаев брался не отработанный пар, а свежий.

В эксплоатации паровой форсун выявил ряд преимуществ:

1) простоту обслуживания,

2) легкость регулировки силы тяги при помощи парового клапана,

3) возможность повышать нагрузку котла до 125% от максимально достижимой при естественной тяге.

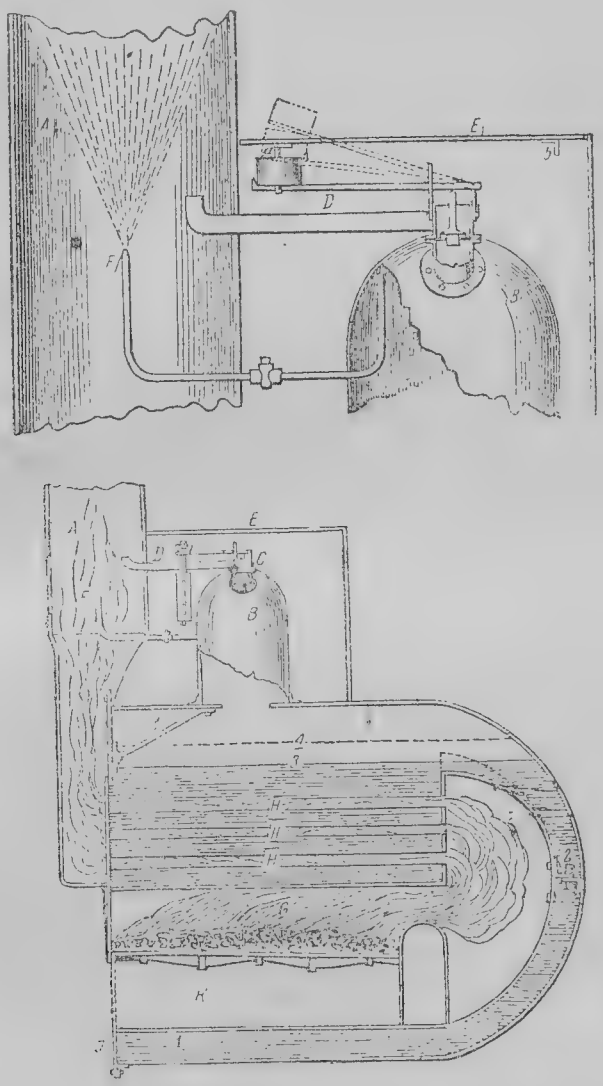


Рис. 54. Паровой форсун.

Одновременно паровой форсун принес с собой и очень существенный недостаток: он требовал для своего действия весьма большого количества свежего пара.

По данным Сеннета[1], паровой форсун потреблял 10% производимого котлом пара при $\frac{B}{R} = 150$ *кг/м²ч*.

---

[1] Сеннет. Паровые машины. Стр. 75, 1886.

Употребление паровым форсуном большого количества пара приводило к необходимости добавления в котел морской воды, что вызывало интенсивное накипеобразование со всеми последствиями.

Испарители же, приготовляющие недостающий для питания котла конденсат, были введены в судовых установках лишь с 80-х гг. XIX в.

На большинстве судов начали отказываться от парового форсуна, и он удержался в применении до наших дней только на паровых катерах и небольших буксирах.

Вместо парового форсуна начали применять вентиляторное дутье, которое также было давно известно. У Тёрстона[1] имеются указания и схематический чертеж, относящийся к 1825 г., парового автомобиля, проработавшего 2 года. Он был оборудован вертикальным водотрубным котлом *ab*, пароперегревателем *ee* и вентиляторным дутьем под решетку (вентилятор 2) (рис. 55).

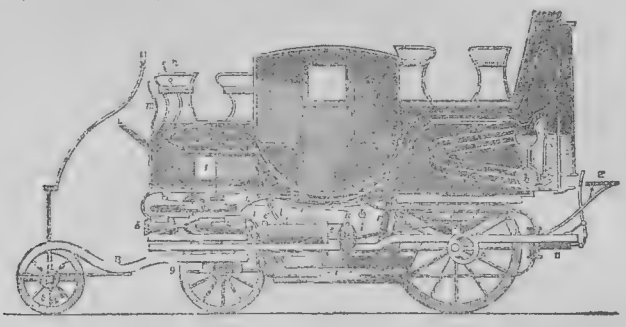


Рис. 55. Паровой автомобиль „Gurney's" 1827 г.

За период освоения работы котлов с искусственной тягой, осуществляемой вентиляторами и эжекторами, выработалось несколько разновидностей вентиляторного дутья. Главные из них следующие:

1. Дутье в герметически закрытую котельную.
2. Дутье в закрытое поддувало (зольник).
3. Дымососная установка.
4. Эжектирующая установка.

Кроме того употреблялось паровое дутье в зольник. Эта система так же, как и паровые форсуны, вытесняется вентиляторным дутьем.

45. Тяга посредством дымососов

Дымососная установка была разработана и введена в эксплоатацию Мартином. Устройство установки Мартина схематически можно представить так: в основании дымохода помещался дымосос (вытяжной вентилятор, приводимый в движение паровой машиной).

Дымосос устанавливался так, что примерно половина сечения дымохода оставалась свободной для прохода газов при вынужденной остановке дымососа. В этом случае одной заслонкой перекрывали вход газов через дымосос, а другой открывали проход газам мимо дымососа. При работе же дымососа делали наоборот.

Эксплоатационная проверка работы дымососов выявила их несомненные преимущества:

1) уменьшение в 4 раза расхода пара на установки в сравнении с работой котла с паровым форсуном (2—3% пара);

[1] Thurston. Die Dampfmaschine. Geschichte ihrer Entwicklung. 1880.

2) использование затрачиваемого на вентиляторную паровую машину пара, который не выбрасывался в атмосферу, а возвращался в виде конденсата через поверхностный холодильник в котел;

3) и, самое основное, — надежность работы дымососной установки.

На пароходе «Olive Branch», на котором температура газов перед дымососом составляла около 230° Ц, за 18 месяцев эксплоатации не было отмечено ни одного случая повреждения дымососной установки [1].

Кроме упомянутых преимуществ, предполагалось, что эта система форсированной тяги окажет меньшее, чем другие, влияние на изнашивание котла. Эти надежды на практике не оправдались. Наоборот, оказалось, что при температуре уходящих газов порядка 300—400° Ц создавались невыносимые для работы дымососа условия. Вентиляторы иногда накаливались до такой степени, что выходили из строя.

Габаритные размеры и вес дымососов получались большими, вследствие большого объема горячих уходящих газов.

Помимо того, существенным недостатком дымососной тяги являлось сравнительно большое разрежение в топке, отчего при открытии топочных дверец в топку могло врываться большое количество холодного воздуха, резко охлаждающее топку и ее стенки. В связи с этим, особенно в локомобильных котлах, наблюдалось появление течи в трубных досках и швах.

46. Тяга непрямого действия

Перечисленные недостатки дымососных установок (тяги прямого действия) привели к мысли о замене их тягой непрямого действия, создаваемой воздушными форсунами. Последние отличались от паровых тем, что в них подавался не пар, а воздух от специального вентилятора.

Как показали опытные наблюдения [2], посредством тяги непрямого действия (рис. 56) удавалось почти в два раза повышать производительность котлов.

Вентилятор *А* данной тяги, как не омываемый горючими газами, ставился меньших размеров и веса, а главное он не подвергался высоким термическим напряжениям и был более надежен в работе.

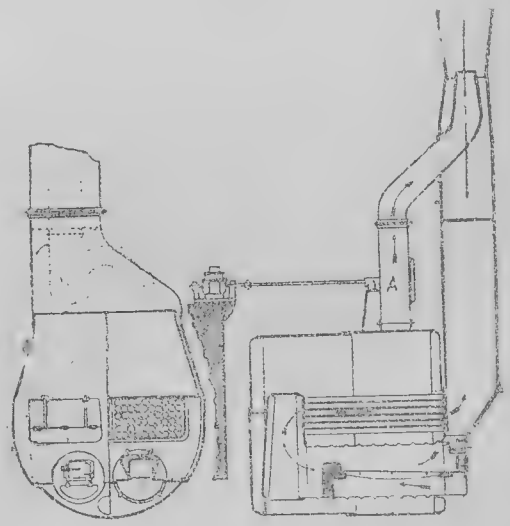


Рис. 56. Устройство тяги непрямого действия.

Тяга непрямого действия принесла с собой и крупный недостаток: большой расход пара на привод вентилятора. Этот расход доходил, по данным Сеннета, до 5% от паропроизводительности котла, т. е. превышал в 2 раза расход пара у тяги прямого действия. Вследствие указанных недостатков тяга прямого и непрямого действия была вытеснена дутьем в закрытую котельную.

---

[1] The Marine Engineer. Стр. 324, 1887.

[2] Сеннет. Паровые машины. Стр. 55, 1886.

47. Дутье в закрытую котельную

Система дутья в закрытую котельную впервые в Англии была применена в 1882 г. на шлюпке «Satellite» и башенном судне «Conqueror». При 4-часовом испытании судна «Satellite» при естественной тяге $\frac{Ni}{R}$ составляло 109 *и. л. с./м²* решетки, при напоре воздуха в котельной 35—50 *мм* вод. ст. $\frac{Ni}{R} = 182$ *и. л. с./м²ч*, т. е. давало увеличение на 66,5%. На «Conqueror» тоже получили 68,6% увеличения при среднем давлении $\Delta S = 38$ *мм* вод. ст.[1].

Во Франции с целью выбора наивыгоднейшей системы искусственной тяги в начале 80-х гг. XIX в. были проведены соревновательные испытания на миноносцах, оборудованных дутьем в закрытую котельную и тягой прямого и непрямого действия.

Данные опытов показали, что расход энергии на вентилятор был наименьшим при применении в установках дутья в закрытую котельную. Было решено применять дутье в закрытую котельную на больших судах.

После первых удачных опытов в 80-х гг. дутье в закрытую котельную получает широкое распространение. Им снабжают все новые крейсера и большое число миноносцев.

Воздух, необходимый для горения топлива, брался снаружи или из какого-нибудь теплого помещения, например из машинного отделения, и нагнетался в герметически закрытую котельную. Этим одновременно достигалось и проветривание машинного отделения.

Для обеспечения нормальной работы при наддуве воздуха в котельную, кроме вентиляторной установки, пристраивалась шахта, предназначаемая для выхода и входа в котельную.

Если вентилятор наддувал воздух в котельную, то при входе в нее необходимо было сначала плотно закрыть наружную дверь шахты и только после этого открывать дверь шахты в котельную. В противном случае могло произойти внезапное падение давления в котельной с выбрасыванием пламени из топок котлов и вытекающими отсюда последствиями (пожар, ожоги обслуживающего персонала и т. д.)

Такое же правило требовалось соблюдать и при выходе из котельной, а именно открывать наружную дверь шахты лишь после плотного закрытия дверей, соединяющих шахту и котельную.

Давление воздуха в котельной не рекомендовалось поддерживать более 50—100 *мм* вод. ст. выше барометрического.

Как показали опыты английского адмиралтейства с миноносцем «Lightning»[2] в начале 80-х гг. XIX в., при достижении давления воздуха в котельной до 150 *мм* вод. ст. нарушалась нормальная работа котла, а именно из дымовой трубы выбрасывались в большом количестве раскаленные частицы угля, величиной в орех, а дымогарные трубки довольно интенсивно зашлаковывались, отчего падала нагрузка котлов.

Для получения опытных характеристик системы дутья в закрытую котельную Маршалл, главный инженер машиностроительной фирмы

---

[1] TINA. Стр. 55—76, 1883. Butler R-1. On the steam trials of the «Satellite» and «Conqueror» under forced draught.

[2] The Engineer. Стр. 465, 1882.

Таблица 9

	Обозначение	Размерность	№ опытов				
			1	2	3	4	5
Продолжительность опытов	Z	час.	1,53	2,38	1,25	1,08	1,68
Давление пара	$P_к$	*ати*	8,82	8,79	8,65	8,44	8,17
Испарено воды в час ($\Delta i = 540$ *кал/кг*)	D	*кг/ч*	16 301	17 689	19 051	18 554	18 063
Испарено воды, нагретой до 100°Ц на *кг* топлива	$H_с$	*кг/кг*	6,97	6,8	6,62	6,57	8,57
Испарено воды на $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м² ч*	78,6	85,3	91,9	89,5	87,1
Сожжено угля в час	B	*кг/ч*	2 342	2 571	2 878	2 814	2 109
Сожжено угля на 1 $м^2$ решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м² ч*	480	526,7	589,7	576,6	432
Давление воздуха в котельной	$\Delta S_{к\text{-}й}$	*мм* вод. ст.	90	92	126	78	51
Давление воздуха в зольнике	$\Delta S_з$	*мм* вод. ст.	79,5	87,5	126	85,3	94,1
Температура воздуха	$t_в$	°Ц	6,7	2,8	3,3	4,4	10
Температура воздуха в котельной	$(t_в)'_m$	°Ц	24	19	19	25	31
Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	621	628	626	654	648
Температура питательной воды	$(t)_к'$	°Ц	2,8	2,3	4,4	3,9	4,4

R. S. W. Hawthorn, Leslie & Co в New Castle on Tyne[1], провел опыты с двумя котлами локомобильного типа. Поверхность нагрева котла составляла $H_к = 207$ *м*². Площадь колосниковой решетки $R = 4{,}9$ *м*². Котлы были установлены в стационарной котельной, уплотненной так же, как и судовые герметически закрытые котельные, так что данные опытов Маршалла можно было применить и к судовым котельным установкам (табл. 9, стр. 97).

Воздух в 1, 2 и 3 опытах подавался в закрытую котельную, а в 4 и 5 опытах один вентилятор нагнетал воздух в закрытую котельную, а другой — в закрытый зольник.

В последних трех опытах работал только один котел, так как мощность вентилятора не могла обеспечить необходимое количество воздуха для работы двух котлов при полной нагрузке.

В первом опыте колосниковая решетка была обычной: толщина колосников 16 *мм*, величина просветов 13 *мм*. Воздух в топку через топочную дверцу не подавался.

Во втором опыте решетка состояла из колосников толщиной в 9,5 *мм*, величина просветов 3 *мм*. Все остальное — как в первом опыте.

В третьем, как и во втором, опыте испытывался один котел, а результаты опытов пересчитывались на два котла.

В четвертом опыте один вентилятор вдувал воздух в котельную, а другой — в зольник.

Часть воздуха вступала в топку через топочную дверцу. Все остальное было, как в третьем опыте.

В пятом опыте воздух в топку не вводился.

Из всех данных опытов особенно выделяются своими большими величинами $\frac{B}{R} = 432—589{,}7$ *кг/м² ч* и соответственно $\frac{D}{H_к} = 87{,}1—91{,}9$ *кг/м²ч*.

Правда, здесь имели место чрезвычайно большие температуры уходящих газов, которые по пяти опытам колебались от 621,1° Ц до 654,4° Ц.

В первых трех опытах воздух нагнетался в закрытую котельную, так что давление в топке было ниже, чем в котельной, на величину сопротивления зольника и колосниковой решетки.

При открытии топочных дверец в топку врывалось большое количество холодного воздуха, что резко охлаждало стенки топки и приводило к появлению течи, главным образом в швах топки и в трубной доске, обращенной к факелу.

В четвертом и пятом опытах один вентилятор нагнетал воздух в зольник, а другой — в котельную. Давление в котельной поддерживалось почти равным давлению в топке. При открытии топочных дверец воздух в топку почти не поступал, и, стало быть, было уменьшено вредное влияние резкого охлаждения топки.

По данным таблицы можно сделать заключение, что с увеличением напора воздуха повышается паронапряжение поверхности нагрева, а испарительность топлива или к. п. д. котла падает.

Из этого факта часть теплотехников сделала выводы, что применение сильного дутья в котельную и в зольник с экономической точки зрения не оправдывало себя. Поэтому они требовали отказа от использования сильного дутья и замены его слабым. Эта опас-

[1] Howden J. On forced combustion in furnaces of steam boilers. TINA, стр. 182—219. 1886 г.

Таблица 10[1]

№ по пор.	Род тяги	Наименование судов	Время испытания	Тип котлов	Суммарная поверхн. нагрева котлов $м^2$ $\sum H_к$	Суммарная площ. колосник. решетки $м^2$ $\sum R$	Продолжительность час. Z	Сожжено топлива в $кг/ч$ B	Мощность $и.\ л.\ с.$ N_i	Расход топлива на 1 $и.\ л.\ с.$ $ч$ $кг/и.\ л.\ с.\ ч$ $\frac{B}{N_i}$	Давление пара в котле $атм$ $P_к$	Вес котлов $т$ $G_к$	Развиваем. мощн. на 1 $кв.\ м$ решетки $и.\ л.\ с./м^2$ $\frac{N_i}{R}$	Развиваем. мощн. на 1 $т$ веса котла $и.\ л.\ с./т$ $\frac{N_i}{G_к}$
1	естественная тяга	„Inflexible"	1878	овал.	2 070	77	6	7 930	8 600	0,924	4,22	768	111,7	11,19
2		„Colossus"	1883	„	1 626	60	5	8 670	7 596	1,142	4,5	604	126,8	12,58
3		„Phaeton"	1884	цилиндр.	1 353	50,7	5	6 060	5 666	1,07	6,33	469	111,7	12,08
1	искусственная тяга	„Howe"	1885	цил.	1 885	70,2	3	—	11 888	—	6,33	642	169,3	18,46
5		„Rodney"	1885	„	1 885	70,2[2]	4	11 180	9 677	0,96	6,33	482	183,7	20,06
6		„Mersey"	1885	„	1 087	37,1	4	7 450	6 720	1,11	7,74	311	181,3	21,66
7		„Scout"	1885	„	573	19,2	—	3 980	3 417	1,16	8,45	177	177,7	19,26
8		„Trafalgar"	1885	„	1 801	56,6	—	—	12 167	—	9,5	522	215,1	23,25

[1] Из доклада Р. Сеннета 13/IV 1886 г. см. Engineer, 24/IV 1886 г.
[2] Суммарная площадь колосниковых решеток у 9 котлов равна 52,7 $м^2$.

ность была несколько преувеличена. Например, по данным опытов главного конструктора английского военного флота, где к концу 80-х гг. XIX в. система искусственной тяги применялась на 60 судах с общей мощностью в 300 000 *и. л. с.*[1], при увеличении паропроизводительности котла на 45% против нагрузки при естественной тяге расход угля повышался на 60%. Отсюда можно сделать важный вывод, что расход угля на 1 *и. л. с. ч* был немногим больше увеличения паропроизводительности.

Дутье в закрытую котельную так же, как и дутье в закрытый зольник, имеет то преимущество, что с применением его можно достигнуть понижения веса котла на 1 *и. л. с. ч.*

По данным табл. 10[2], на броненосце «Inflexible» при естественной тяге в 1878 г. на 1 $м^2$ решетки машины развивали 111,7 *и. л. с.*, а на 1 *т* веса котлов приходилось только 11,2 *и. л. с.* В 1885 г. на крейсере «Mersey», благодаря применению дутья в закрытую котельную, при напоре воздуха в 51,3 *мм* вод. ст. на 1 $м^2$ решетки приходилось 181,3 *и. л. с.* развиваемой мощности машины, а на каждую тонну веса котла — 21,66 *и. с. л.*

Лучшие результаты опытов были получены на броненосце «Trafalgar». На нем удалось $\frac{N_i}{R}$ довести до 215 *и. л. с.*/$м^2$ *ч*, а на 1 *т* веса котлов машины вырабатывали 23,25 *и. л. с.*

При пробных испытаниях, проведенных Томсоном[3] на испанском крейсере «Reina Regente» с искусственной тягой, удалось развить мощность машин на 1 $м^2$ решетки до 237 *и. л. с.*

Наглядное представление о понижении веса котла, достигнутого благодаря применению искусственной тяги, может дать следующее сравнение: вес котла броненосца «Trafalgar» с искусственной тягой при одинаковой мощности был в два раза менее, чем у броненосца «Inflexible» с естественной тягой.

Главной причиной такого сильного понижения веса котлов на единицу мощности машины следует считать применение дутья в закрытую котельную. К числу других преимуществ дутья в закрытую котельную следует отнести:

1. Независимость силы тяги, а стало быть, и паропроизводительности котла от силы и направления ветра, как при естественной тяге.

2. Отсутствие на верхней палубе большого количества вентиляторных труб, через которые при применении ранее рассмотренных систем искусственной тяги воздух засасывался в котельные.

3. Отсутствие специальных приспособлений для уменьшения напора воздуха при открытии топочных дверец.

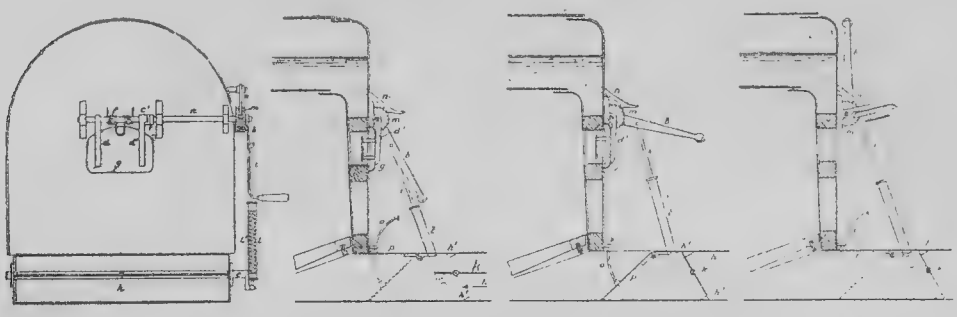
Дутье в закрытую котельную не свободно и от недостатков. Самый крупный из них — увеличение избытка воздуха при открывании топочных дверец, отчего топка очень интенсивно охлаждается. Вследствие резкого изменения температуры стенок топки может иметь место появление течи в первую очередь в трубных досках, обращенных к факелу. Это явление чаще всего наблюдалось в локомотивных котлах.

48. Дутье в закрытый зольник

В некоторых случаях при выборе систем дутья вопрос решался в пользу закрытого дутья в зольник. При системе дутья в закрытый

[1] TINA. Стр. 1—17. White W. H. On the speed trials of recent warships. 1886.
[2] V D I. Стр. 917—920. 1886.
[3] The marine engineer. Стр. 291, 1887, и V D I. Стр. 300. 1887.

зольник вентилятор нагнетает воздух по особому воздуховоду не в котельную, а непосредственно в зольник. Это не дает возможности холодному воздуху попадать в топку при открытии топочных дверец, так как давление в топке выше давления в котельной. Однако, это принесло с собой новый, не менее важный недостаток: возможность выбрасывания пламени при открытии топочных дверец.



a *b* *c*

Рис. 57. Дутьевое устройство Шихау.

Для выравнивания давления в котельной и в топке инженеры котлостроительных заводов разработали и ввели в эксплоатацию специальное приспособление, посредством которого при открытии дверец подача воздуха в зольник автоматически прекращалась специальной заслонкой, а стало быть, и отпадала опасность выбрасывания пламени из топки.

Такое устройство сделано например Шихау (E. Schichau) (по немецкому патенту № 23581, 1883 г.).

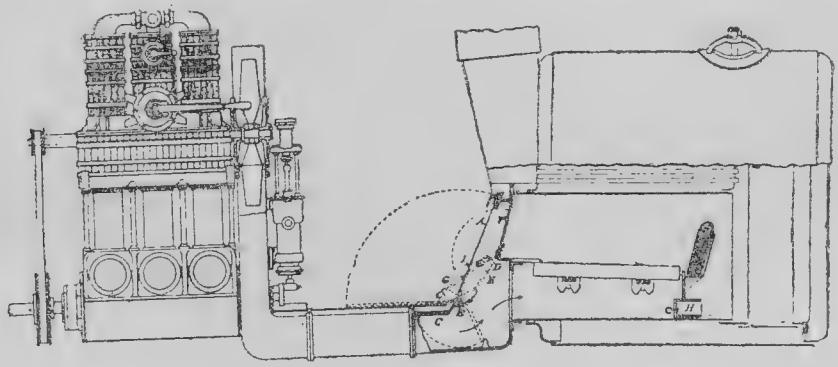


Рис. 58. Устройство нижнего дутья системы „Willans'a."

На рис. 57 показаны три положения механизма. 1-й рис. 57 *a* показывает положение механизма, когда в зольник подается воздух; в этом случае заслонки *p* и *k* открыты для пропускания воздуха в зольник.

На рис. 57 *b* показано положение системы во время выгреба золы из зольника. Здесь заслонка *k* закрыта, а заслонка *p* опущена вниз. Благодаря этому представляется возможность производить выгреб золы и очаговых остатков.

Наконец, третье положение механизма во время открытия топочных дверец показано на рис. 57 *с*.

Другая заслуживающая внимания система нижнего дутья, относящаяся к 1885 г., принадлежит Уилленсу (Willans) [1]. По устройству (рис. 58) она совершенно такая же, как и у Шихау. Выгодной особенностью системы Уилленса является возможность производить удаление золы из-за топочного порога во время работы топки, для чего служит пробка *H*, легко вынимаемая и закладываемая посредством крючка. Давление воздуха при этой системе поддерживалось в 10—15 *мм* вод. ст.

Не менее интересной является индивидуальная система нижнего дутья Fothergill'a [2], показанная на рис. 59. Отличительная особенность ее:

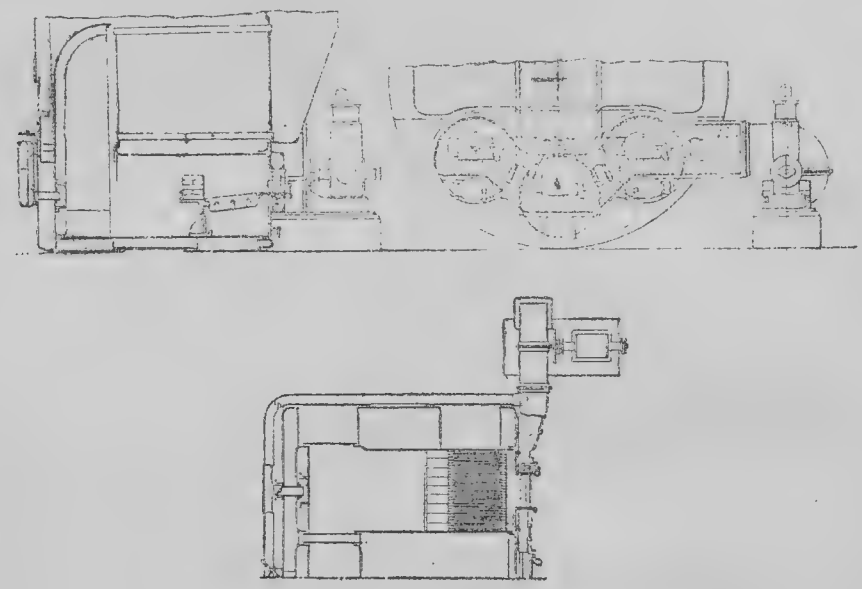


Рис. 59. Индивидуальная система нижнего дутья.

создание весьма высокого напора вплоть до 90 *мм* вод. ст. Специальными заслонками можно изменять напор воздуха в очень широких пределах, снижая его до 13—18 *мм* вод. ст.

Каждый котел имеет свою индивидуальную дутьевую установку. Искусственная тяга в котле не зависит от тяги в других котлах.

Преимущества дутья в закрытый зольник:

1) отсутствие попадания большого количества холодного воздуха в топку при открытии топочных дверец;

2) увеличение интенсивности горения в одной топке при чистке решеток в других топках, отчего уменьшается падение паропроизводительности котла;

3) возможность приспособления дутья в закрытый зольник для подогрева воздуха.

К недостаткам дутья в закрытый зольник следует отнести:

1) трудность удаления шлака;

---

[1] TINA. Стр. 166—178. Robinson M. On the application of moderate forced draught to the furnaces of small steam vessels upon Willans system. 1885.

[2] The Engineer. T. I, стр. 274, 1888.

2) возможность выбрасывания пламени при открытии топочных дверец вследствие поломки запирающих приспособлений (заслонок и рычагов);

3) увеличение веса и стоимости данной системы против ранее рассмотренных систем.

В заключение заметим, что обе системы дутья — как в закрытую котельную, так и в зольник — по эксплоатационным наблюдениям практически равноценны. Но для больших пароходов и военных кораблей рекомендовалось устанавливать дутье в закрытую котельную, так как система воздуховодов у многих больших котлов была сложна. Для пароходов же с 1 и 2 котлами устанавливалось, главным образом, дутье в закрытый зольник.

Из других систем нижнего дутья следует остановиться на дутье в открытый зольник и закрытую топку[1] (рис. 60). Эта система дутья

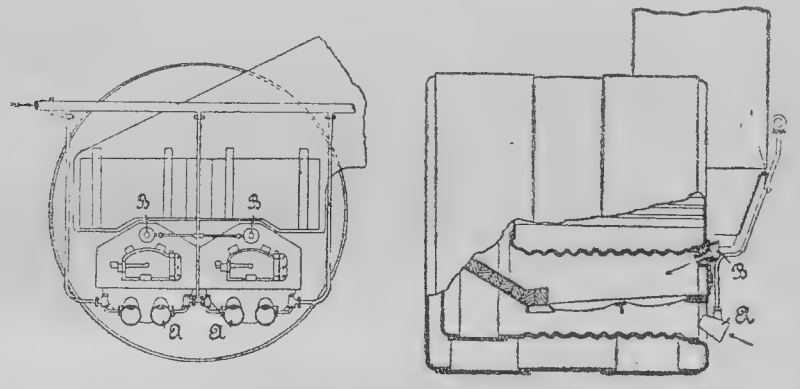


Рис. 60. Устройство дутья в открытый зольник и закрытую топку.

была запатентована Андерсоном и Киннелем (Anderson и M. Kinnell) в 1888 г. В данной системе необходимый для горения топлива воздух эжектировался при помощи пара через насадки *AB*.

Преимущества системы заключаются в отсутствии движущихся частей, благодаря чему она не требует почти никакого ремонта в эксплоатации.

Однако, рассматриваемая система нижнего дутья имела и свои недостатки. Главный из них: пар, расходуемый на эжекцию воздуха, является потерянным, и поэтому в судовых условиях приходилось увеличивать производительность испарителей на величину потери пара.

В речных же судовых установках ввиду питания котлов пресной водой эта система получила сравнительно широкое распространение.

Перейдем к рассмотрению некоторых общих характеристик искусственной тяги.

49. Общие характеристики искусственной тяги

Применение искусственной тяги позволило использовать в судовых котельных установках низкосортное топливо.

62 парохода, принадлежащие итальянскому пароходному обществу Florio Rubatino, были снабжены решетками Фернандо, состоя-

[1] The marine Engineer. Стр. 176—178. Trial trips «Empress». 1888.

щими из колосников толщиной в 14 *мм* с просветами в 1,5 *мм*. На этих пароходах было установлено слабое дутье в зольник. Сжигался низкосортный уголь New-Castle.

Мощность котлов и машин повысилась настолько, что пароходы увеличили свою скорость с 9 до 9,75—10 узлов, при одновременной экономии топлива (в среднем 2 *т* угля в день).

Вышеупомянутое общество установило решетки Фернандо с нижним дутьем на пароходах «Candia»[1] и «Malta», которые при пробных рейсах развивали скорость 14,6 узла. Мощность машин пароходов равнялась 1450 *и. л. с.* при 10,5 *ати* давления пара в котле. Расход угля составлял 2 *т*, т. е. 0,6 *кг* на 1 *и. л. с. ч.*

Fothergill[2] описывает установку парохода, который в течение 1884—1887 гг. был снабжен слабым нижним дутьем. На этом пароходе для достижения экономии за счет повышения $\frac{H}{R}$ вместо увеличения поверхности нагрева была уменьшена площадь колосниковой решетки. Опыты показали хорошие результаты, несмотря на то, что сжигались низкосортные топлива.

Применение слабого дутья для высокосортного угля дало бы еще лучшие результаты (табл. 11).

Таблица 11

Наименование судов	Колосниковая решетка		Весовое напряжение решетки (в *кг/м²ч*)		Примечание
	укорочена на *см*	уменьшена на %	перед переделкой	после переделки	
„Marmora" . . .	38,1	29,4	76,56	103,94	Скорость судна и расход угля не изменились. Применение низкосортных углей уменьшило эксплоатационные расходы на 43%.
„Dania"	71,1	46,6	87,88	129,33	Скорость судна не изменилась. Экономия топлива 18—20%.
„Etna"	76,2	50	70,77	108,82	Скорость судна на 5% выше. Экономия топлива 7,75%.
„Hypatia"	68,6	42,8	87,88	131	Скорость судна немного больше. Экономия топлива 13%.

При применении искусственной тяги достигается хорошее перемешивание воздуха с углем, процесс горения проходит при лучших условиях, чем при естественной тяге.

[1] Engineering. T. II, стр. 483, 1887.
[2] Engineering. T. II, стр. 167, 1887.

Опытами, которые были проведены на французском броненосце «Marceau» в начале 1885 г. Обществом металлургических заводов и верфей в Марселе[1], было установлено что с увеличением весового напряжения решетки посредством дутья уменьшалось не только количество воздуха, потребляемого на 1 *кг* топлива, но и улучшался процесс горения (табл. 12).

Таблица 12

Весовое напряжение решетки $\frac{B}{R}$ в *кг/м² ч*	Расход воздуха на 1 *кг* угля $V_в$ *м³/кг*	Анализ дымовых газов		
		CO_2 в %	CO в %	O_2 в %
101,3	12,41	—	—	—
150,7	12,315	—	—	—
201,45	11,06	14,25	0,45	5,5
250,00	11,22	13,85	0,70	5,40
300,00	8,22	13,85	0,40	3,90
300,00	8,5	16,6	0,7	2,60

Аналогичные данные были получены Hoadley[2], который производил опыты при естественной тяге со стационарным котлом.

Применение нижнего дутья, как это доказано многочисленными эксплоатационными наблюдениями, приводило к укорочению срока службы котлов.

В связи с этим появилась необходимость увеличения прочности котлов.

Сеннет в докладе, прочитанном в Институте морских архитекторов в марте 1883 г., подробно изложил те улучшения, которые были введены в технологический процесс производства котлов, например сверление дыр на месте и т. д. В результате улучшения технологического процесса изнашиваемость котла уменьшилась. По данным Сопер'а (Soper) (доклад в том же Институте в 1888 г.), 8 котлов английского двухвинтового эсминца «Polyphemus» с машинами мощностью 5520 *и. л. с.* после трехлетнего плавания при тщательном осмотре были найдены в удовлетворительном состоянии. Котлы «Polyphemus'а» были снабжены нижним дутьем; никакого приспособления для перехода на естественную тягу не было. Эсминец мог работать с первоначальным давлением пара в 7,73 *ати*.

Уотсон (Watson)[3] сообщает, что в котлах низкого давления, установленных на старом пароходе, было введено нижнее дутье.

Мощность машин повысилась с 3200 *и. л. с.* до 3800—4000 *и. л. с.* Пароход эксплоатировался более года, и никаких поломок не наблюдалось.

На каждом пароходе, принадлежавшем лорду Бродерсу[4] (Brothers), устанавливались котлы низкого давления с нижним дутьем.

Результаты опытной работы одного из таких пароходов показаны в табл. 13[5] (стр. 106).

---

[1] Bienaymé. Les machines marines. Стр. 470, Paris, 1887.
[2] Hoadley. Warm-blast steam-boiler furnace. Стр. 120, New-York, 1886.
[3] Transactions of the institution of naval architects. Стр. 36, 1885.
[4] The Engineer. T. II, стр. 162, 1885.
[5] Annales industrielles. Стр. 536, 1895.

Таблица 13

№ пробных рейсов	I	II	III
Способ тяги	Естественная	Естественная	Искусственная (нижнее дутье в закрытую котельную)
Продолжительность рейса в час	2,95	3,10	2,47
Среднее давление в котле в *ати*	1,79	1,93	1,84
Развиваемая мощность в *и. л. с.*	5111	6101	6337
Средняя скорость судна в узлах	18,9	18,0	20,24

Дутьевая котельная установка рассматриваемого парохода Бродерса представлена на рис. 61. Пароход во время трех пробных рейсов на расстоянии 56 морских миль между Holyhead и Kingston достигал скоростей 18—20,24 узла. Колесные пароходы «Manas Quelen» [1],

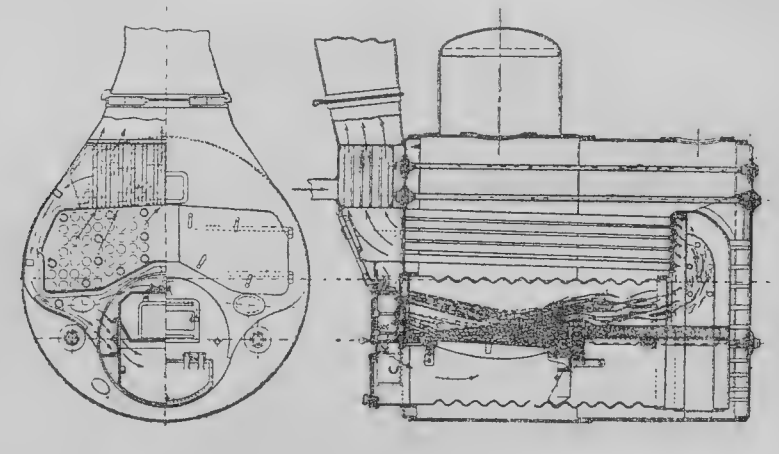


Рис. 61. Устройство горячего дутья в топку и зольник.

«Queen Victoria» [2] и пароход «Prince of Wales» [3] показали на испытаниях новые рекорды с применением нижнего дутья. Первый пароход развивал скорость 19,4, второй — от 21 до 22,6 узла. Последний же пароход давал скорость 24, 25 узла. Два последние парохода развивали мощность по 7 тыс. *и. л. с.* Нижнее дутье вполне оправдывало себя.

Отметим еще особо опыты, проведенные французским морским инженером Оденэ (Audenet) с котлом (рис. 62), у которого дымогарные трубки были разделены на три пучка так, чтобы газы последовательно проходили их.

Опыты при естественной тяге дали весовое напряжение решетки 60 *кг/м²* ч. Испарительность топлива была равна 8,5. Применение же

[1] Engineering. Т. I, стр. 544, 1886.
[2] Engineering. Стр. 497, 1887.
[3] Engineering. Стр. 521, 1887.

нижнего дутья позволило сжигать на 1 $м^2$ решетки 160 *кг* угля в час, испарительность была получена равной 9,9, т. е. к. п. д. котла повысился на 16%. Если сбросить служебный расход на дутье в 5%, то чистая экономия топлива составляла 11%.

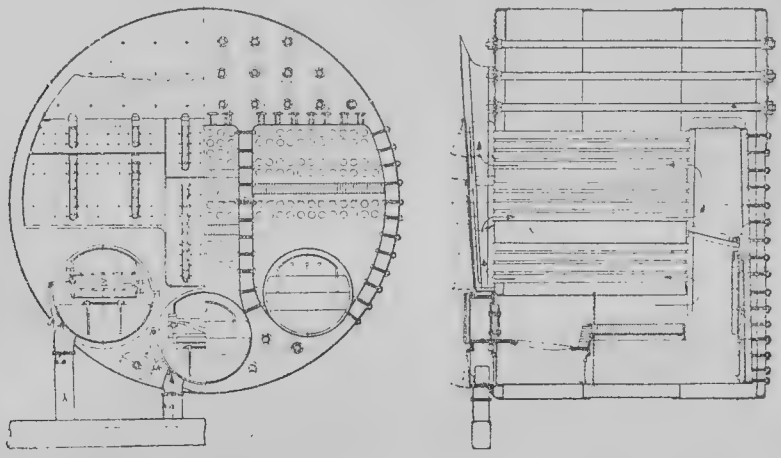


Рис. 62. Котел „Audenet'a".

50. Подогреватели воздуха

Применение усиленной искусственной тяги влекло за собой значительное снижение к. п. д. котла. Об этом говорят, например, опыты Маршалла (табл. 13-а).

Таблица 13-а

	№ опытов			
	1	2	3	4
Давление воздуха в котельную в *мм* вод. ст.	126	92	90	51
Испарено воды, нагретой до 100° Ц 1 *кг* топлива	6,62	6,8	6,97	8,7

Эффективной мерой борьбы против снижения к. п. д. котла было увеличение нагревательных поверхностей.

Рассмотренный выше способ Оденэ не давал абсолютного увеличения поверхностей нагрева котла. Он несколько повышал паропроизводительность к. п. д. котла, но такое повышение мало удовлетворяло пароходовладельцев, и не во всяком котле можно было конструктивно осуществить этот способ увеличения к. п. д.

Широкого распространения не получил и способ Уилленса [1]: увеличение поверхностей нагрева за счет установки большого числа дымогарных труб меньшего диаметра. Он отличался дороговизной и трудностью выполнения установки.

[1] Engineering. T. I, стр. 50, 1885.

Увеличения же поверхностей нагрева за счет постановки в дымовую коробку пароперегревателя нельзя было осуществить по той причине, что в 80-х гг. XIX в. временно отказались от перегрева пара.

Выход из данного положения был найден Гоуденом, который первый подал мысль и использовал на практике тепло уходящих газов для подогрева поступающего в топку воздуха.

Надо полагать, что эта мысль возникла у него по аналогии с идеей пароперегревателя, тем более что конструктивное выполнение его первого воздухоподогревателя представляло собой почти полную копию описанных выше вертикальных перегревателей.

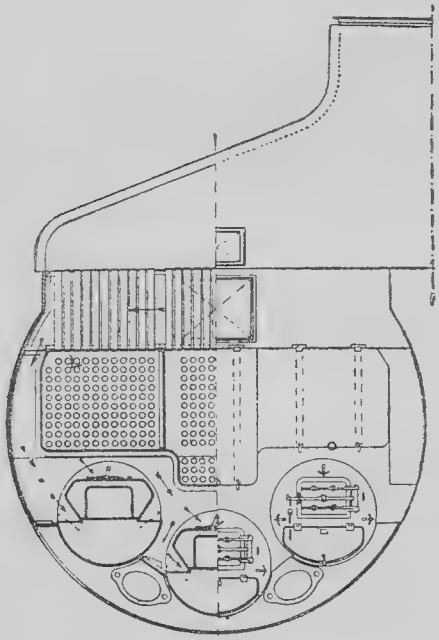


Рис. 63. Шотландский котел с подогревателем воздуха Гоудена.

Подогреватель воздуха Гоудена (рис. 61 и 63) состоял из пучка труб, вертикально установленных в дымовой коробке. Трубки внутри омывались дымовыми газами, а снаружи воздухом.

В подогреватель Гоудена воздух нагнетался специальным вентилятором. Из подогревателя воздух направлялся частично в зольник, а частично в топку через раму топочных дверец.

Трубки в подогревателе Гоудена омывались воздухом, проходящим перпендикулярно к их осям. Эксплоатационные наблюдения показали, что передача тепла к нагреваемой среде в данном случае значительно выше, чем при параллельном омывании трубок газами и воздухом.

С целью увеличения теплопередачи в воздухоподогревателе Гоуден помещал в трубки спиральные железные полосы, что увеличивало путь и время соприкосновения горячих газов с трубками.

Эксплоатационные наблюдения над работой топки с горячим дутьем показали значительное улучшение процесса горения, главным образом вследствие повышения температуры топки. Горение протекало интенсивнее и совершеннее. Одновременно же увеличивались паропроизводительность и к. п. д. котла.

Представление о преимуществах подогрева воздуха дает табл. 14.

В табл. 14 для сравнения взяты результаты испытания одного котла, имевшего обыкновенную топку, и второго котла, оборудованного воздухоподогревателем системы Гоудена. Давление пара в обоих котлах было равным 6 *ати*. Топка Гоудена в соединении с машиной тройного расширения пара давала экономию топлива примерно 30%.

То же показали проведенные в 1887 г. испытания почтовых пароходов «Ohio» и «City of Venice» с новыми котлами, на которых в одно время машины-компаунд были заменены машинами трех- и четырехкратного расширения [1]. Мощность машин была равна 1200—1400 *и. л. с.* при давлении в котле 11,25 *ати* [2].

[1] The Marine Engineer. Стр. 405, 1887.
[2] Engineering. T. I, стр. 66, 1887.

Таблица 14

	Число топок	Общая площ. колосник. решеток	Поверхн. нагрева котла	Развиваемая мощность	Расход угля			Пробные рейсы совершались на участке в годах
					на 1 *и. л. с. ч*	на 1 $м^2$ решетки	фактически	
Обозначения . .	—	$\sum R$	$H_к$	N_i	$\frac{B}{N_i}$	$\frac{B}{R}$	B	—
Размерность . .	—	$м^2$	$м^2$	*и. л. с.*	*кг/и. л. с. ч*	*кг/м² ч*	*кг*	—
Старый котел .	4	6,97	201,87	564	1	82,6	13 500	Из Барбадоса в Лондон в 1881 г.
Новый котел . .	3	3,34	122,6	623	0,63	113,5	9 500	То же в 1885 г.

При четырехчасовом испытании на пароходе «Ohio»[1] была достигнута мощность в 2124 *и. л. с.* Это составляло 205 *и. л. с./м²* решетки при расходе угля 0,558 *кг/и. л. с. ч.* Пароход развивал скорость 14,2 узла. Расход угля был понижен с 46 до 27 *т.* Экономия топлива составляла примерно 40%. Испытания, проведенные позже, дали менее благоприятные результаты, а именно расход угля повысился с 0,558 до 0,68 *кг* на 1 *и. л. с. ч*, несмотря на то, что во время опытов сжигали лучший каменный уголь (Welsh).

По данным Гоудена, пароход «New-York City», снабженный его воздухоподогревателями, проработал в море 5 лет без единого повреждения[2].

Пароход «Ohio» 26 октября 1887 г. во время восьмичасового испытания в море дал расход угля на 1 *и. л. с. ч* только 0,63 *кг*. Отметим, что от главных котлов питались вспомогательные механизмы и употреблялся пар на бытовые нужды. Предполагалось, что расход топлива на главные механизмы не превышал 0,57 *кг* на 1 *и. л. с. ч.*

Однако, по сообщению Паркерса (Parkers)[3], сделанному им в марте 1888 г. на годовом собрании английских судостроителей и морских инженеров, дутьевое воздухонагревательное устройство парохода «Ohio» во время первых трех рейсов дало мало удовлетворительные результаты.

После значительного усовершенствования установки пробные рейсы в октябре 1888 г. дали лучшие результаты. После этого топки Гоудена были установлены на пароходе компании Inman-Linie и многих других.

---

[1] Engineering. T. II, стр. 90, 1887.
[2] The marine Engineer. Стр. 291—364, 1887.
[3] Engineering. Стр. 328. Leverich G. The cable railway on the New-York and Brooklin Bridge. 1888.

Интересно отметить опытные данные двух совершенно однотипных пароходов «Gravina» и «Churruca» Гамбургского пароходного общества, которые были снабжены машинами тройного расширения мощностью по 600 *и. л. с.* Давление пара в котлах было равно 11,25 *ати*. Пароход «Gravina» был снабжен обычной топкой. Во время рейса из Гамбурга в Барселону и обратно на пароходе было израсходовано 264 *т* угля, в то время как пароход «Churruca», снабженный топкой Гоудена, при таком же рейсе израсходовал 207 *т* угля, что дало экономии 20%. Примерно такие же данные имеются и по другим опытам с топками Гоудена.

Так, например, братья Sachsenberg, впервые применившие в Германии установку Гоудена на своем буксирном пароходе «Johann Faber V», получили расход угля на 1 *и. л. с. ч* = 0,57 *кг*. Установка была снабжена двухцилиндровыми машинами Компаунда. Давление пара равнялось

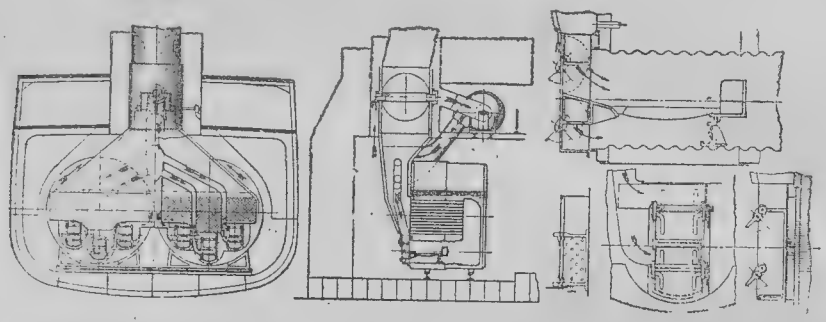


Рис. 64. Котел парохода „Stella“ с воздухоподогревателем „Wyllie.“

7 *ати*. На пробном рейсе от Кельна до Рура 27 сентября 1886 г. они развили мощность от 518 до 537 *и. л. с.* при часовом расходе топлива 300 *кг*. При движении против течения мощность, развиваемая машинами, достигала 578—597 *л. с.* при расходе угля 400 *кг/ч* или 0,7 *кг* на 1 *и. л. с. ч*. При обыкновенной эксплоатации на пароходе «Johann Faber V» расход вестфальского угля составлял в среднем 0,7—0,73 *кг/и. л. с. ч*.

Удачные опытные данные воздухоподогревателей Гоудена породили ряд других конструкций воздушных подогревателей. Появился воздушный подогреватель Вилли (Wyllie) [1] (рис. 64). Свой воздухоподогреватель Вилли установил в 1887 г. на пароходе «Stella» с машиной тройного расширения. Отличительная особенность подогревателя Вилли заключалась в том, что воздух вводился в топку и в зольник под одинаковым давлением, тогда как у Гоудена воздух в топку подводился под большим напором.

В котле, снабженном подогревателем Вилли, воздух подавался и в газовую коробку через особые щели в топочном пороге. Пароход «Stella», работая при давлении в 10 *ати*, на пробном рейсе развил мощность 932 *и. л. с.* [2]. Во время двух рейсов из Англии в Ост-Индию пароход шел со скоростью 8,5 узла. В день расходовалось 14 *т* низкосортного угля, т. е. примерно 0,7 *кг* угля на 1 *и. л. с. ч*.

Из других заслуживающих внимания систем подогрева воздуха можно назвать систему горячего дутья Грина (Green) [3].

---

[1] Transactions of institution of mechanical engineers. Стр. 489—498, 1886.
[2] V D I. Стр. 449, 1887.
[3] Engineering. Стр. 322, 1887.

С конца 80-х гг. подогрев поступающего в топку воздуха начал широко применяться не только в судовых, но и в стационарных котельных установках.

Успешное применение подогревателей воздуха дало идею испытать в судовых котлах подогрев питательной воды за счет теплоты уходящих газов.

51. Подогрев питательной воды

Идея подогрева питательной воды теплотой уходящих газов впервые была дана Эвенсом в 1801 г. Экономайзеры Эвенса имели небольшую поверхность нагрева, были громоздки, а, главное, давали небольшой подогрев воды и вследствие этого широкого распространения не получили.

Больших успехов в уменьшении этих недостатков достиг в 1845 г. Эдвард Грин в Англии. Прибор Грина, который он назвал водяным экономайзером, предназначался для стационарных установок[1]. За 50-летний период со дня создания экономайзера Грина (с 1845 по 1895 г.) им было снабжено 150 000 паровых котлов.

В судовых же котлах идею подогрева воды теплотой уходящих газов осуществил Гоуден[2].

Гоуден провел испытания котла, оборудованного водяным подогревателем — экономайзером своей системы, и сравнил данные этих испытаний с эксплоатационными наблюдениями над работой силовой установки с воздушным подогревателем на пароходе «New-York City» (табл. 15).

Таблица 15

	Поверхность нагрева $м^2$	Увеличение т-ры воздуха или воды в подогревателе °Ц	Нагревалось *кг* воздуха или воды на 1 *кг* сожженного топлива *кг/кг*	Использовано тепла для подогрева воздуха или воды в подогревателе *кал/кг* топлива
	H	Δt	L или U	$Q_{под}$
Воздухоподогреватель	21,36	105	17,5	$105 \cdot 0{,}238 \cdot 18 = 462$
Водяной экономайзер	28,24	14	10	$14 \cdot 1 \cdot 10 = 140$

Как показывает табл. 15, тепло, передаваемое водяному экономайзеру, отнесенное к 1 *кг* топлива, в три раза меньше тепла, передаваемого воздушному подогревателю, несмотря на то, что поверхности нагрева водяного экономайзера на 38% больше, чем в воздушном экономайзере.

52. Водяной экономайзер Кемпа

Над усовершенствованием конструкции водяных экономайзеров очень много работал Кемп[3]. Первые свои водяные экономайзеры он

[1] Рюль. Подогрев питательной воды отходящими газами. ГТИ, 1930.

[2] Transactions of the institution of naval architects. Стр. 182—219. Howden J. On forced combustion in furnaces of steam boilers. 1886.

[3] Английский патент № 5814, 1885 г.

установил на французском пароходе «Bleville»[1]. Котельная установка этого парохода была испытана в конце 1886 г.[2] (рис. 65). Подогреватель Кемпа состоял из 4 пучков труб, входящих в специальные во-

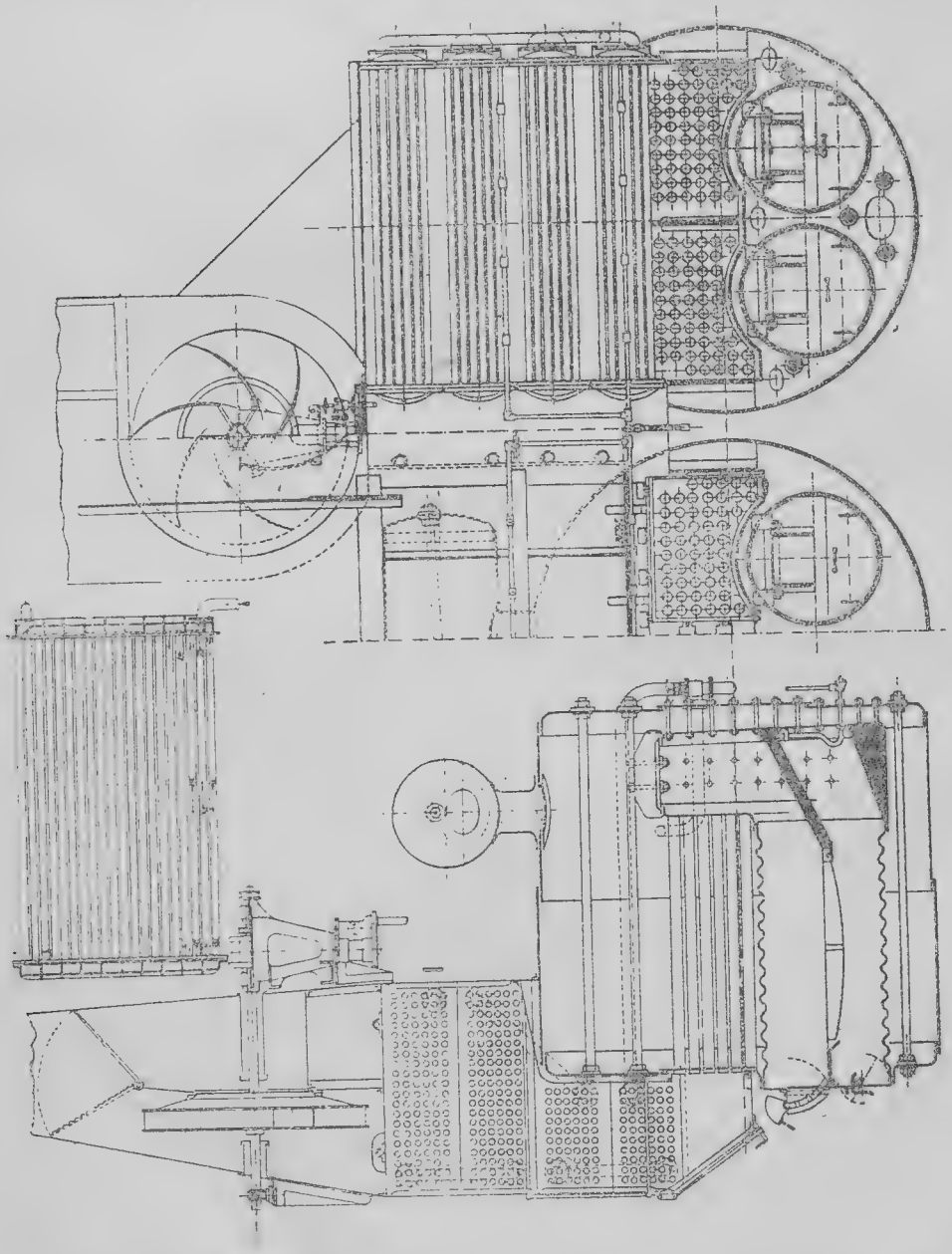


Рис. 65. Шотландский котел с подогревателем Кемпа и дымососом.

дяные камеры. Каждая камера была разделена на несколько частей таким образом, что вода проходила путь в 160 *м*. Сопротивление движению воды на таком большом пути сотавляло лишь 0,28—0,35 *ати*,

[1] Engineering. T. I, стр. 54. Kemp's high and low temperature marine boilers, 1887.
[2] V D I. Стр. 436, 1887.

а скорость движения воды в трубках подогревателя по Эссену = = 0,178 *м/сек*.

Пробные рейсы парохода «Bleville» из Глазго в Гавр показали, что ежедневный расход шотландского угля составлял 10,5 *т*. Машины развивали мощность 715 *и. л. с.* Пароход шел со скоростью 10 узлов. Среднее весовое напряжение решетки было 66 *кг/м²ч* или 0,63 *кг/и. л. с. ч.*

Сравним опытные данные котельной установки парохода «Bleville», оборудованной водяным перегревателем Кемпа, с данными котельной установки парохода «New-York City» с воздушным подогревателем Гоудена. В своей установке Кемпу удалось нагревать воду в среднем на 133° при испарительности топлива в 10.

С 1 *кг* топлива на подогрев воды заимствовалось тепла от уходящих газов $133 \times 1 \times 10 = 1330$ *кал* или примерно в 10 раз больше, чем в подогревателе Гоудена, и в три раза больше, чем в воздушном подогревателе Гоудена (табл. 16).

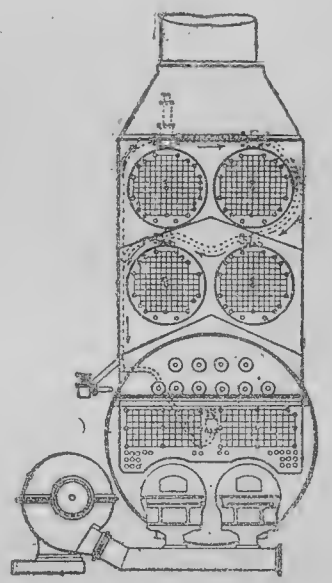


Рис. 66. Котел с подогревателем Кемпа новой конструкции.

Эксплоатационные наблюдения над работой подогревателя Кемпа выявили ряд конструктивных недостатков. Новейшие установки Кемп снабжал более совершенными подогревателями.

Позднейшая конструкция подогревателя Кемпа была установлена на пароходе «Caloric» (рис. 66). В табл. 17 параллельно приведены данные испытания подогревателей Кемпа, установленных на пароходе «Bleville» и пароходе «Caloric». За 14 месяцев пароход «Caloric» прошел 45 тыс. морских миль. Котлы поставляли машинам пар давлением 11,25 *ати*. Расход угля на 1 *и. л. с. ч* при машинах тройного расширения составлял 0,57 *кг/и. л. с. ч*. Тщательный осмотр водяного подогревателя выявил, что некоторые его трубки подвергались коррозии под действием цилиндрового масла и воздуха, поступающего в растворенном виде с питательной водой. Когда в подогревателе были установлены цинковые пластинки, а воду перед поступлением в подогреватели стали очищать от масла и воздуха в специальных фильтрах и питательных приспособлениях, этот недостаток был устранен.

Несмотря на указанные выше опыты, хорошо известные в широких кругах технических работников, о подогреве питательной воды в 90-х гг. XIX в. еще нельзя было сделать окончательных выводов. Вопрос оставался нерешенным, что полезнее устанавливать: водяные или воздушные перегреватели с искусственной тягой. Эксплоатационные наблюдения на пароходе «Caloric» давали часто мало достоверные и полные пробелов данные.

Однако, работы по освоению конденсационных силовых установок, широкое применение холодного и горячего дутья, а также применение подогрева питательной воды, продвинули далеко вперед развитие судовой теплотехники.

Борьба за повышение мощности и к. п. д. установки велась и по линии применения повышенного давления пара.

Таблица 16

Испытуемая установка	Наименование судна	Площадь колосник. решетки $м^2$	Поверхность нагрева котла $м^2$	Поверхн. нагрева подогревателя $м^2$	Давление пара *ати*	Система машин	Мощность машин *и. л. с.*	Расход угля		Скорость судна узлы
								на 1 *и. л. с. ч* $кг/и.\ л.\ с.\ ч$	на 1 $м^2$ решетки $кг/м^2\ ч$	
		R	$H_к$	$H_п$	$P_к$		N	$\frac{B}{N_i}$	$\frac{B}{R}$	C
Воздухоподогреватель Гоудена	„New-York City“	3,34	122,6	21,36	5,6	2-цилиндровый компаунд	623	0,63	120	9,5
Водяной подогреватель Кемпа	„Bleville“	6,69	164,25	315,0	11,25	—	715	0,63	66	10,5

Таблица 17

Наименование судна	Год постройки	Площадь колосник. решетки $м^2$	Поверхность нагрева		Отношение пов. нагр. воздухоподогревателя к пов. нагр. котла	Отношение пов. нагр. котла к площади колосник. решетки	Температура воды в конце подогревателя °Ц	Температура уходящих газов °Ц
			в котле $м^2$	в подогревателе $м^2$				
		R	$H_к$	$H_п$	$\frac{H_{в.\ п}}{H_к}$	$\frac{H_к}{R}$	$t''_{в.\ э.}$	$t_{ух}$
„Bleville“	1886	6,69	164,25	315	1,91	25	85	220
„Caloric“	1887	3,58	149,8	325,6	2,17	41,70	80	245

53. Замена инжекционных холодильников-конденсаторов поверхностными

Применение инжекционных холодильников на судах тормозило повышение давления пара в котле, так как питание последнего производилось морской водой. Котлостроительные заводы, эксплоатационный персонал и исследователи-химики были мобилизованы на освоение в судовых установках уже давно известных поверхностных конденсаторов, которые могли обеспечить питание котлов водой, почти свободной от солей и накипеобразователей.

Идея применения поверхностных холодильников была дана еще Уаттом в конце XVIII в., а в 1788 г. Фитч установил поверхностный конденсатор на своем пароходе «Perseverance». В 1833 г. Хербертом (Herbert) и Доном (Don) были взяты патенты на поверхностный холодильник.

Холодильник Херберта и Дона состоял из большого сосуда. В днище сосуда вставлялся пучок трубок, по которым прогонялся пар, отработанный в машине. Трубки омывались снаружи холодной водой, и пар, проходя по ним, конденсировался, нагревая окружающую трубки воду.

В 1835 г. Симингтон (Symington) взял патент на конденсацию отработанного пара забортной холодной водой. Он рекомендовал пропускать отработанный пар через трубки, укрепленные вдоль киля снаружи корпуса корабля.

В 1838 г. I. B. Humphrys взял патент на поверхностное охлаждение пара. Этот холодильник отличался от холодильника Херберта и Дона тем, что охлаждаемая вода в нем была проточной.

При применении поверхностных конденсаторов наблюдалось резкое сокращение службы котлов в сравнении с применением инжекционного способа конденсации пара. Этим объясняется пренебрежительное отношение к поверхностным конденсаторам. Несмотря на большую давность их изобретения, они не были освоены еще и к началу 60-х гг. XIX в.

Большие повреждения ряда котлов пароходов P. and O. Company в 1862 г., получившиеся вследствие введения поверхностных холодильников, заставили очень серьезно заняться исследованием этого явления[1]. Работа была поручена трем известным профессорам-химикам: Летебу (Letheb), Хофману (Hofman) и Орстону (Orston). Вопросами коррозии котлов занималось еще несколько ученых, например д-р Перси (Percy) и др.

Для разрешения этого вопроса Английским адмиралтейством был создан специальный комитет. Отчет о работе комитета был напечатан в Синей книге за 1877 г. Все члены комитета высказывали самые разноречивые предположения о причинах разрушения котлов.

Одни утверждали, что причиной разъедания котлов следует считать действие гальванического тока, который образуется от трубок красной меди холодильника и железных частей котла, составляющих вместе большую батарею.

Другие думали, что разрушение котла происходит от действия жирных кислот на его стенки. Последние могли выделяться из сала или растительного смазочного масла под действием высоких температур пара.

---

[1] Сеннет. Морские паровые машины. Стр. 120, 1886.

Для устранения разъедания жирными кислотами стенок котла сало и животные масла начали заменять минеральными маслами. После такой замены сильного разъедания стенок котла не замечалось.

Более тщательными исследованиями было установлено, что одной из основных причин разъедания стенок котла является присутствие воздуха в котловой воде.

Только к концу XIX в. совершенно правильно определили, что одной из причин разъедания стенок котла является действие электролитов. Электролитом считали морскую воду в присутствии в ней хотя бы следов солей щелочи или кислот. В этом случае в котловой воде появляются гальванические токи, которые направляются от обнаженных стенок котла через воду к окалине и снова к стенкам. Последние под влиянием токов разъедаются.

Если же в водяное пространство котла поместить цинковые пластинки и обеспечить хороший железный контакт их со стенками котла, то от цинка в соленую воду и железо и обратно в цинк пойдет гальванический ток. Цинк подвергнется разъеданию, а на поверхности стенок котла будет выделяться тонкий слой водорода, который и явится защитой от разъедания.

Как показали эксплоатационные наблюдения, разъедание цинковых пластинок происходило весьма интенсивно. В докладах котельной комиссии Английского адмиралтейства можно найти такие данные по этому вопросу. Годовой расход прокатанного цинка на английском транспортном судне «Crocodile» составлял 278,5 *кг* на каждый котел, а на таком же транспортном судне «Serapis» действительная убыль цинка, определяемая взвешиванием его до и после плавания, доходила до 106,5—188,4 *кг*/котел.

Данные исследований показали, что поверхностные холодильники явились лишь внешней причиной коррозии стенок котла, поскольку применение их в то время повлекло за собой введение в котел масла и воздуха.

Когда же с 70-х гг. XIX в. приняли меры к устранению попадания масла и воздуха в водяное пространство котла и одновременно в последнем начали устанавливать цинковые пластинки, то разъедание стенок котла значительно уменьшилось. Это дало возможность применять в судовых установках исключительно поверхностные холодильники. Введение последних на судах позволяло работать при повышенном давлении пара.

КОНСТРУКЦИИ СУДОВЫХ ОГНЕТРУБНЫХ КОТЛОВ

54. Низкие коробчатые котлы (Германия)

Для повышения давления до 3—4 *ати* строились коробчатые огнетрубные котлы с утолщенными стенками и с большим количеством болтовых связей. Коробчатые котлы еще в 60-х гг. XIX в. считались основным типом котлов.

Ниже мы приводим описание конструкций котлов этого типа и опытные данные о них.

На рис. 67, 67а показаны коробчатые котлы, устанавливавшиеся на судах с мелкой осадкой.

Дымогарные трубки у котлов помещены рядом с топкой. Этим удовлетворялось требование военного флота о размещении котлов и механизмов военных судов ниже ватерлинии.

Форма корпусов у коробчатых котлов, как правило, делалась

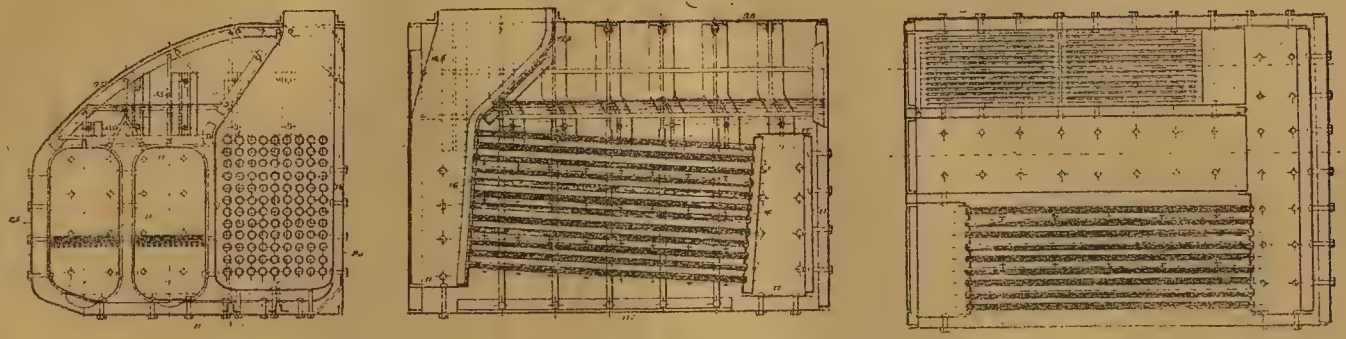


Рис. 67. Коробчатый котел с топками, имеющими общую газовую коробку и расположенными на уровне дымогарных трубок.

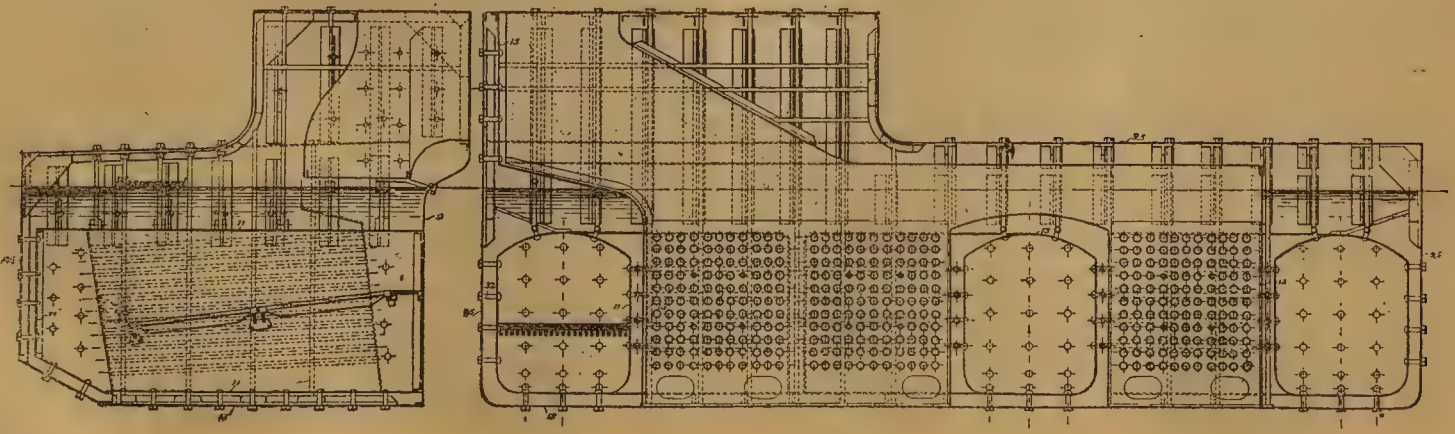


Рис. 67а. Коробчатый котел с топками, имеющими индивидуальные газовые коробки и расположенными на уровне дымогарных трубок.

прямоугольной. Иногда же одна из сторон корпуса скашивалась в соответствии с обводами корабля.

Расположение топок у котлов выполнялось перпендикулярно к дымогарным трубкам (рис. 68).

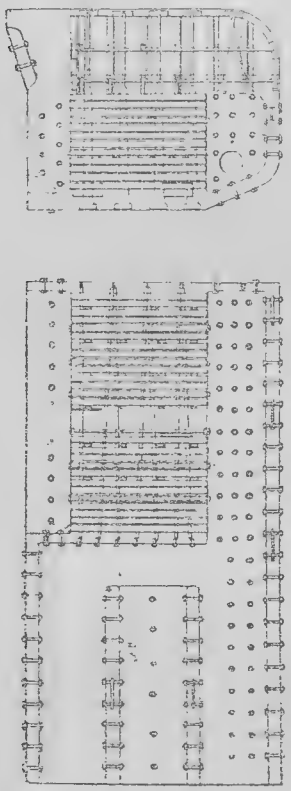


Рис. 68. Коробчатый котел с топками, расположенными перпендикулярно дымогарным трубкам.

В котлах с параллельным расположением топок и дымогарных труб у каждой топки имелась своя система трубок. Иногда (рис. 67а, 68) все топки имели одну общую газовую коробку, что являлось недостатком конструкции котла.

При открытии топочных дверец у одной топки, тяга понижалась сразу у всех топок, отчего падала и паропроизводительность котла. У котлов с перпендикулярным расположением топок по отношению к трубкам газовая коробка была общей (рис. 68).

Большим недостатком коробчатых котлов рассматриваемой конструкции являлась неравномерность тепловосприятия отдельных поверхностей нагрева. Нижние ряды труб воспринимали значительно меньше тепла, чем верхние. Основная масса газов устремлялась только в верхние ряды. От неодинакового тепловосприятия в дымогарных трубках возникали сильные термические напряжения, которые часто приводили к появлению течи в трубных досках.

Чтобы достигнуть сравнительно равномерного распределения газов в дымогарных трубках, в конце топки сверху устраивали отражательные сводики, которые отклоняли топочные газы вниз. Это мероприятие дало мало результатов.

Выгодными особенностями конструкций данных коробчатых котлов являлись сравнительно большие $\frac{V_к}{H_к}$, $\frac{V_к}{D}$, $\frac{D}{H_к}$, $\frac{B}{R}$ (табл. 18, п. 1—3).

Крупный недостаток этих котлов — частые появления течи в трубных досках — заставил котлостроительные заводы отказаться от дальнейшего строительства их.

55. Плоскодонные (мокродонные) коробчатые котлы (Германия)

Большое распространение в судовых установках получили так называемые плоскодонные коробчатые котлы, показанные на рис. 69. Этот тип котлов был ведущим в продолжение 50—70-х гг. XIX в., т. е. до того времени, пока давление в силовых установках не было повышено сверх 4 *ати*. Для этих пределов давлений они неплохо справлялись со своими задачами и даже в некоторых случаях давали весьма хорошие эксплоатационные характеристики. Как показывает табл. 18, п. 4—9, $\frac{D}{H_к}$ колебалось от 33 до 46 *кг/м²ч* и в среднем для 34 котлов составляло 38 *кг/м²ч*. Весовое напряжение тоже было отно-

сительно велико: $\frac{B}{R}$ = 97—150 *кг/м²ч*. Средний же вес котлов с водой, отнесенный к *и. л. с.*, составлял 63 *кг/ и. л. с.* против 112 *кг/и. л. с.* у котлов предыдущего типа. Объем, занимаемый котлом, отнесенный

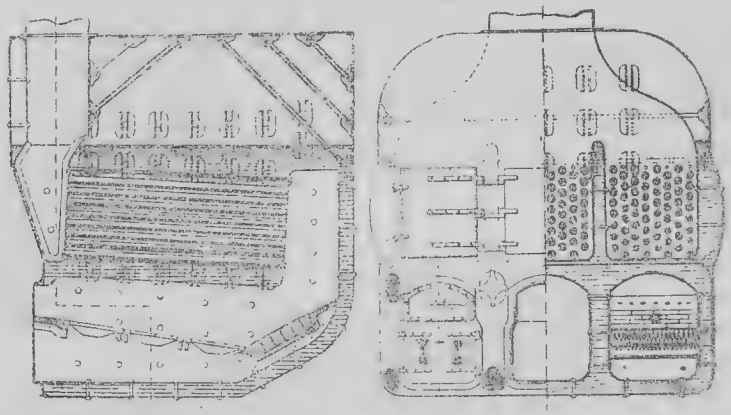


Рис. 69. Плоскодонный коробчатый котел.

к 1 *т* пара, производимого им, был равен в среднем 6,7 *м³/т*, тогда как эта же величина для котлов с дымогарными трубками 20—50-х гг. XIX в. равнялась приблизительно 26 *м³/т*, т. е. была в 4 раза больше.

Перейдем к рассмотрению конструктивных особенностей данного типа котлов. На рис. 69а показан плоскодонный котел, устанавли-

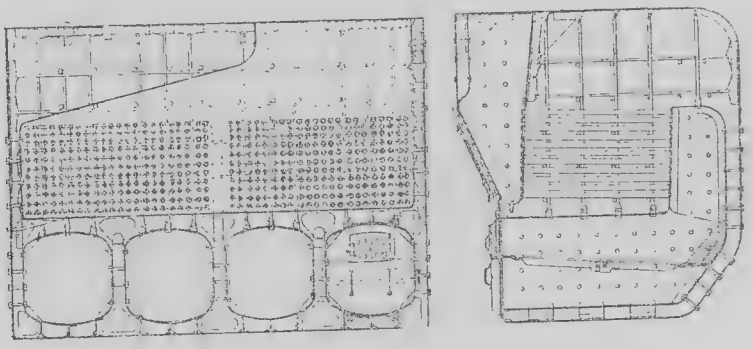


Рис. 69а. Мокродонный коробчатый котел.

ваемый на деревянных настилах. Для предупреждения возможности возникновения пожара дно корпуса котлов омывалось котельной водой. Действие влаги через деревянный настил передавалось дну котла, отчего поверхность его разъедалась ржавчиной. Осмотр днища не представлялось возможным сделать, из-за чего вырастала опасность взрыва котла от ослабления днища.

Другим недостатком данной конструкции являлось наличие заклепочных швов в топочном пространстве. Находясь под непосредственным действием пламени, швы подвергались сильным термическим напряжениям, в результате чего в них часто появлялись течи.

Таблица 18

Основные характеристики судовых огнетрубных котлов 70—90-х гг. XIX в.

№ по порядку	Название судна	Рисунок	Год постройки	Система котлов	и. л. с. маш.				Главн. разм. котла			Толщина стенок котла					Связи		Топка		Колосниковая решетка				Поверхн. нагрева 1 котла	Дымогарные трубы			
					Обсл. давл. пара в котле в $кг/см^2$	Число котлов	Мощн. маш. при естеств. тяге и нормальн. нагрузке	Мощн. маш. при искусств. тяге и форсир. нагр.	Длина	Ширина	Высота	Наружн. стенки	Днище	Топка	Трубные доски	Дымоходы	Диам. связи	Диам. нарезн. связи	Число в одном котле	Высота или диаметр	Длина	Ширина	Площадь в одном котле	Живое сечение		Наружн. диаметр	Толщ. стенки	Длина между трубн. доск.	Число труб
									м	*м*	*м*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*		*м*	*мм*	*мм*	$м^2$	%	$м^2$	*мм*	*мм*	*м*	шт.
1	Канонерская лодка „Cyclop“	67	1874	Коробчатые	3,0	2	173	245	3,226	2,387	2,235	10	11	11	16	13	32	32	2	1,20	2,184	0,534	2,279	25	72,6	69	3,0	2,134	104
2	Корвет „Medusa“	67	1865	„	3,0	4	479	611	3,073	2,982	2,377	10	13	11	16	11	39	32	2	1.20	2,275	0,75	3,400	22	85,2	63,5	2,5	1,98	174
3	„Victoria“ и „Augusta“	67a	1878	„	3,0	4	1127		3,00	7,020	3,000	10	13	11	16	13	35	32	3	1,20	2,00	1,0	6,450	38	170,0	63,5	2,5	2,0	351
4	Авизо „Kaiseradler“	69	1876	„	3,0	2	2170	2650	2,819	6,199	3,160	10	13	11	16	13	36	32	5	1,020	1,674	1,046	8,753	23	231,38	63,5	2,5	1,70	530
5	Крейсер „Blücher“	70	1877	„	3,0	4	2055	2529	2,819	3,779	3,160	10	13	11	16	13	36	32	3	1,020	1,674	1,046	5,253	23	138,8	63,5	2,5	1,70	318
6	„ „Stein“	70	1880	„	3,5	4	2151	2707	2,812	6,199	3,160	10	13	11	16	13	36	32	5	1,150	1,674	1,046	8,755	25	230,55	63.5	2,5	1,732	530
7	Бр. фрегат „Preussen“	70	1875	„	3,0	6	3861	4386	2,820	6,407	3,148	10	13	11	16	13	37	33	5	1,150	1,674	1,046	8,755	25	239,7	76.0	3,0	1,77	430
8	„ „ „Friedrich der Grosse“	70	1876	„	3,0	6	4446	4930	3,060	5,492	3,766 3,770	10	13	11	16	13	39	33	5	1,098	2295	0,922	10,58	30	287.3	63,5	2.5	2.014	572
9	Бр. фрегат „Kaiser“	70	1873	„	3,0	8	5200	7803	3,080	5,492		10	13	13	16	13	45	32	5	1,120	2.336	0,90	10,511	25	275.1	63.5	2,5	1.90	580
					3,0	8	5200	7803	3,067	5,20	3,680	10	13	10	16	13	39	32	5	1,143	2,438	0,824	10,230	27	275,24	76,0	3.0	1.95	475
10	Авизо „Zieten“	80	1875	Пролетные	6,5	6	1951	2350	5,283		2,261	14	14	10	18	6	50 38	32	2	0,927	1,98	0,927	3,67	32,0	119.3	70	3.0	2,11	226
11	Крейсер „Habicht“	80	1879	„	7,0	2	698	875	5,480		2,40	13	16	15	21	6	33	32	2	0,97	2,52	0,970	4,888	31,0	153,9	76	3,0	2,12	268
12	„ „Sperber“	80	1888	„	8,0	4	1509	1710	4,700		2,38	14,5	18	12	19	4	54	32	2	0,96	1,70	0,96	3,250	25,0	116,0	63.5	2.75	1,80	246
13	„ „Falke“	82	1891	„	13,0	4	2205	2910	5,020		2,84	22	23	15	22	5	59 36	35	3	0,97	1,88	0,93	5,250	46,0	170,0	63,5	4,0	1,99	324
14	Катер I класса	120	1894	„	10,0	1		44	1,450		1,110	10	12	10	12	2	22 30	26	1	0,695	0,66	0,86	0,57	49,0	16,8	35,0	2,0	0,625	234
15	„ III „	120	1892	„	10,0	1		21	1,170		0,856	8	11	9	11	1,5	20	20	1	0,51	0,51	0,57	0,322	50,0	7,12	30,0	2,0	0,504	130
16	Броненосец „Wespe“	72a	1878	Шотландские ординарные	5,0	4	660	800	2,35		2,816	18	18	11	18	5	48	25	2	0,80 0,94	1.66	0,80	2,65	41	73.65	63,5	2,5	1,7	181
17	Авизо „Blitz“	72a	1882	То же	6,0	8	2273	2803	2,90		2,96	16	16	11	18	5	45	32	2	0,84	1,90	0,88	3,45	44	98,5	76	3,0	2,16	164
18	Крейсер „Olga“	72a	1880	„ „	6,0	8	2121	2297	2,60		3,15	16	15	12	18	8	52	32	2	0,92	1,86	0,92	3,40	30	98,0	76	3,0	1,87	180
19	„ „Sophie“	72a	1881	„ „	6,0	6	1930	2257	2,70		3,30	18	16	12	16	8	40	32	2	1,03	1.85	1,023	3.8	25	106,0	76	3.0	1,93	198
20	„ „Alexandrine“	72a	1886	„ „	6,0	8	1974	2552	2,60		3,20	18	15	10	18	6	52	32	2	0,92	2.0	0,92	3,68	18	98,8	76,0	3,0	1,92	182
21	Броненосец „Oldenburg“	72a	1886	„ „	6,0	8	3236	4004	3,00		3,84	20	18	11	18	6	12 55 43	32	3	0,96	2,0	0,96	5,76	14	162,0	76,0	3,0	2,2	258
22	„ „Brandenburg“	76a	1891	„ „	13,0	12	8105	9997	3,02		3,96	28,5	22	14	22	4,5	48 51	38	3	0,95	2,0	0,97	5,83	18	190,9	63,5	3.0	2.075	306
23	Броненосец „Wörth“	76a	1892	„ „	13,0	12	8199	10363	2,90		3,96	28,5	22	14,5	22	5	57 46	36	3	0,95	2,0	0,97	5,85	39	196,0	63,5	3.0	2,135	319

Продолжение табл. 1

№ по порядку	Название судна	Рисунок	Год постройки	Система котлов	Характеристика котлов: Паров. пространство $V_п$ м³	Водян. пространство $V_в$ м³	Поверхн. нагр. на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma H_к}{N_i}$ м²/и. л. с.	Площ. колосн. решетки на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma R}{N_i}$ м²/и. л. с.	Поверхн. нагр. к площ. реш. $\frac{H_к}{R}$ м²/м²	Одного котла $G_к$ кг	Вес: Одного котла с водой $G_{к+в}$ кг	Всех котлов на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_к}{N_i}$ кг/и. л. с.	Всей котлов. воды на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_в}{N_i}$ кг/и. л. с.	Всех котлов с водой на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_{к+в}}{N_i}$ кг/и. л. с.	Характеристика котла: Лощ. сил. на 1 м² реш. $\frac{N_i}{\Sigma R}$ и. л. с./м²	и. л. с. на 1 м нагрева котла с водой $\frac{N_i}{\Sigma G_{к+в}}$ и. л. с./м	Паропроиз. котла при иск. тяге, полагая $\Delta i = 540$ кал/кг D кг/час	Паропряж. пов. нагр. котла, полагая $\Delta i \cong 540$ кал/кг $\frac{D}{H_к}$ кг/м² ч	Весовое напряж. решетки $\frac{B}{R}$ кг/м² ч	Отнош. объема зан. котлом к 1 м² пов. нагрева $\frac{V_к}{H_к}$ м³/м²	Отнош. объема зан. котлом к паропроиз. котла $\frac{V_к}{D}$ м³/т	Весов. характеристики котла: Отношен. веса котла к кг произв. в час пара $\frac{G_к}{D}$ кг/кг	Отнош. веса котла к 1 м² поверхн. нагрева $\frac{G_к}{H_к}$ кг/м²	Отнош. веса котла с водой к паропр. котла $\frac{G_{к+в}}{D}$ кг/кг	Отнош. веса котла с водой к пов. нагр. котла $\frac{G_{к+в}}{H_к}$ кг/м²
1	Канонерская лодка „Cyclop“	67	1874	Коробчатые	2,69	5,44	0,58	0,018	31,8	10335	15766	82,7	43,5	126,9	55	8	2080	27,5	140	0,24	8,3	5	143	7,6	218
2	Корвет „Medusa“ . . .	67	1865	„	3,99	7,555	0,42	0,017	25,0	10970	18525	54,8	37,8	92,6	59	11	2600	30	160	0,256	8,4	4,25	130	7,1	218
3	„Victoria“ и „Augusta“ .	67a	1878	„	10,16	13,21	0,52	0,019	26,3	25270	38180	77,7	40,6	118,3	53	8,45	4800	28	140	0,27	13,1	5,3	150	8,0	225
4	Авизо „Kaiseradler“ . .	69	1876	„	11,93	19,03	0,34	0,013	26,5	25000	44033	38,0	28,3	66,5	77,9	15,1	7,8	34	130	0,24	7,1	3,2	108	5,65	190
5	Крейсер „Blücher“ . .	70	1877	„	7,43	11,69	0,34	0,013	26,5	16200	27890						4,7	34	130	0,24	7,2	3,45	118	6,0	201
	„ „Stein“	70	1880	„	11,37	17,69	0,37	0,014	26,3	24480	42170	39,1	28,3	67,4	71,4	14,8	8,25	35	128	0,24	6,7	3,0			
					11,60	20,3	0,38	0,014	27,4	26416	46716	42,2	32,5	74,7	71,4	14,0	8,85	36,5	128	0,24	6,4	3,0	110	5,3	194
6	Бр. фрегат „Preussen“ . .	70	1875	„	13,81	22,7	0,32	0,012	27,1	28570	51270	31,8	25,2	57,0	85,0	17,5	9,5	33	96,7	0,23	7,0	3,0	100	5,4	178
7	„ „Friedrich der																								
8	Grosse“	70	1876	„	14,79	22,81	0,30	0,012	26,5	27916	50727	31,0	25,3	56,3	85,6	17,3	10,7	39	110	0,24	6,1	2,6	101	4,75	184
9	Бр. фрегат „Kaiser“ . .	70	1873	„	11,95	20,1	0,27	0,010	26,8	26889	46988	26,9	20,1	47	97,8	21,3	12,7	46	150	0,21	4,6	2,1	98	3,7	170
10	Авизо „Zieten“	80	1875	Пролетные	4,13	9,565	0,30	0,009	32,5	12939	22504	33,0	24,3	27,3	106,7	17,4	4,08	33	150	0,177	5,4	3,22	109	5,5	189
11	Крейсер „Habicht“ . . .	80	1879	„	4,64	10,591	0,37	0,011	31,5	16492	27083	51,9	35,3	90,2	61,4	11,1	4,375	28,5	150	0,161	5,65	3,76	107	6,35	177
12	„ „Sperber“ . . .	80	1888	„	4,0	8,14	0,31	0,01	35,6	14877	23017	39,7	21,7	61,4	115,4	15,5	4,27	36,8	150	0,18	4,9	3,5	128	5,4	199
13	„ „Falke“	82	1891	„	4,85	12,95	0,24	0,007	32,4	54469	38419	36,5	18,5	54,9	133,3	17,9	5,47	32	150	0,187	5,8	4,65	149	6,25	225
14	Катер I класса	120	1894	„	0,33	0,57	0,42	0,014	29,5	1528	2098	38,2	14,5	52,6	70,2	19,1	0,44	38	150	0,083	3,2	3,15	91	4,8	125
15	„ III „	120	1892	„	0,15	0,28	0,36	0,020	22,1	726	1266	36,2	27,0	63,2	62,5	15,8	0,21	34	150	0,094	3,2	3,65	102	6,0	178
16	Броненосец „Wespe“ . .	72a	1878	Шотландские ординарные	3,42	6,15	0,46	0,015	27,8	8679	14829	49,6	35,1	84,7	66,0	11,8	2,0	22,4	135	0,202	7,5	4,33	118	7,4	200
17	Авизо „Blitz“	72a	1882	То же	3,64	8,96	0,36	0,012	28,5	11550	20512	42,0	32,6	74,6	98,0	16,5	3,5	29	109,5	0,203	5,7	3,15	117,5	5,9	208
18	Крейсер „Olga“	72a	1880	„ „	4,25	8,09	0,37	0,013	27,0	12787	20874	48,7	30,8	79,5	77,2	12,6	2,9	27	98	0,206	7,0	4,1	130	7,2	213
19	„ „Sophie“ . . .	72a	1881	„ „	4,35	10,71	0,30	0,011	28,0	12922	23632	36,9	30,6	67,5	92,1	14,8	3,75	30,4	119	0,27	6,1	3,45	121	6,3	223
20	„ „Alexandrine“ .	72a	1886	„ „	4,88	8,35	0,33	0,012	26,8	13071	21421	43,6	27,8	71,4	81,5	14,0	3,2	25	135	0,211	6,6	4,1	131	6,7	219
21	Броненосец „Oldenburg“	72a	1886	„ „	7,26	14,05	0,20	0,017	25,0	19996	34016	41,0	28,7	69,7	84,6	14,3	5,0	25	135	0,214	6,9	4,0	124	6,8	210
22	„ „Brandenburg“	76a	1891	„ „	5,11	15,68	0,25	0,008	32,8	31700	47380	42,3	20,9	63,2	128,6	15,8	8,3	23,2	135	0,196	4,5	3,8	161	5,7	249
23	Броненосец „Wörth“ . .	76a	1892	„ „	6,37	14,83	0,26	0,008	33,5	31270	56100	41,7	19,7	74,8	128,2	13,2	8,6	22,7	135	0,182	4,2	3,6	160	6,5	286

№ по порядку	Название судна	Рисунок	Год постройки	Система котлов	и. л. с. маш.				Главн. разм. котла		
					Обсл. давл. пара в котле в *кг/см²*	Число котлов	Мощн. маш. при естеств. тяге и норм. нагрузке	Мощн. маш. при искусст. тяге и форсир. нагр.	Длина	Ширина	Высота
									м	*м*	*м*
24	Авизо „Greif“	76	1886	Шотландские двойные	8,0	6	4108	5717	5,500	3,2	
25	Крейсер „Irene“	76	1888	То же	8,0	4	6649	8003	6,00	4,51	
26	„ „Prinzess Wilhelm“	76в	1889	„ „	8,0	4	7919	9241	6,00	4,51	
27	Транспортное судно „Pelikan“	76	1891	„ „	13,0	2	1973	3072	5,90	4,0	
28	Импер. яхта „Hohenzollern“	76в	1892	„ „	13,0	4 4	6571	9634	6,15	4,2	
29	Крейсер „Kaiserin Augusta“	76	1892	„ „	13,0	8	12506	14015	5,90	4,0	
30	Крейсер „Gefion“ . . .	76	1893	„ „	13	4 2	6588	9553	6,0	3,85 3,45	
31	Броненосец „Brummer“	83	1883	Локомот.	8	2	1181	1636	2,478 2,238	2,304 3,522	2,217
32	Авизо „Jagd“	83	1888	„	11	4	2580	4134	2,660 3,340	2,304 2,314	2,422
33	Броненосец „Siegfried“ .	83	1890	„	13	4	3629	4953	2,60 2,95	3,03 2,35	1,896
34	„ „Hagen“ . .	84	1894	„	13	4	3322	4516	3,11 2,78	3,30 2,74	1,767
35	Авизо „Comet“	83	1892	„	13	4		4742	2,93 2,31	3,0 2,5	1,717
36	Паровой катер кл. А .	84	1894	„	13	1		170	1,28 0,82	1,2 1,118	0,788
37	„ „ кл. В .	84	1894	„	13	1		130	1,1 0,76	1,2 1,118	0,788
38	Вспомогательные котлы большого крейсера .		1877		3	1				1,08	2,69
39	Вспомогательные котлы малого крейсера . . .		1877		3	1				0,82	2,31

№ по порядку	Толщина стенок котла					Связи		Топка		Колосниковая решетка				Поверхн. нагр. 1 котла	Дымогарные трубы			
	Наружн. стенки	Днище	Топка	Трубные доски	Дымоходы	Диаметр связи	Диам. парезн. связи	Число в одном котле	Высота или диаметр	Длина	Ширина	Площадь в одном котле	Живое сечение		Наружный диаметр	Толщина стенки	Длина между труб. доск.	Число труб
										l	*b*	*R*	*f*	$H_п$	*d*	*δ*	*l'*	*n*
	мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*		*м*	*мм*	*мм*	*м²*	%	*м²*	*мм*	*мм*	*м*	шт.
24	18	18	11	19	8	54	32	4	0,92	2,0	0,92	7,36	29	207,5	76	3,0	2,0	308
25	25	25	13	22	8	55	32	6	1,25	2,0	1,25	15,0	37	436,0	76	3,0	2,25	684
26	25	18		12,5	5	50	32	8	1,05	1,905	0,98	16,0	36	475	76	3,0	2,20	760
27	30	15	15	25	4	59	35	6	1,0	2,0	1,0	12,0	21	390	76	3,0	2,15	480
28	30	22	13,5	20	5	58	42	8	1,0	2,0	1,0	16,0 18,0	7	445,5 223,2	76	3,5	2,25	290
29	30	23	15	22	4	46	32	6	1,0	2,0	1,0	12,0	33	411,5	63,5	3,0	2,912	636
30	28	25	16	22	5	60	30	6	1,15	2,10	1,15	12,0	34	379,0	64	3,0	2,32	552
	25	25	15	22	4	45	25	4	1,0	—	0,95	9,2	29	296,8				448
31	19	19	15	25 22	5 5	49 32	26	2	1,5	1,9	0,993	3,78	26	260,67	52	2,5	3,5	420
32	14 18	22 19	16	25	5	49	32	2	1,69	2,0	0,95	3,8	60	2551,1	52	3,0	3,5	416
33	16 18	22,5 20,5	16	25 20	5 4	57	32	2	1,88	2,0	1,35	5,4	26	252,3	52	3,0	3,08	464
34	12 18	20	17	22 20	5 4	60 48	35 28	2	1,27	1,99	1,44	5,72	40	246,3	55	2,5	2,9	486
35	22 18	18,5	17	22 20	3	49 46	35 32	2	1,7	2,1	1,29	4,28	49	212,6	50	2,5	2,4	514
36	9	11	7	12	2	32	22	1	1,65	0,93	1,07	1,0	37	27,85	32	1,7	0,85	268
37	9	11	7	12	2	32	22	1	0,65	0,78	1,07	0,85	19	24,0	32	1,7	0,78	265
38	10	11	11	16	10	—	—	1		0,900		0,636	25	16,4	37	2,5	0,93	124
39	8	10	10	12	8	—	—	1	—	0,65		0,232	28	7,06	37	2,5	0,79	54

№ по порядку	Название судна	Рисунок	Год постройки	Система котлов	Характеристика котлов: Паровое пространство $V_п$ м³	Водяное пространство $V_в$ м³	Поверхн. нагр. на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma H_к}{N_i}$ м²/и. л. с.	Площ. колосн. решетки на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma R}{N_i}$ м²/и. л. с.	Поверхн. нагр. к площ. реш. $\frac{H_к}{R}$ м²/м²	Одного котла $G_к$ кг	Вес: Одного котла с водой $G_{к+в}$ кг	Всех котлов на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_к}{N_i}$ кг/и. л. с.	Всей котлов. воды на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_в}{N_i}$ кг/и. л. с.	Всех котлов с водой на 1 и. л. с. $\frac{\Sigma G_{к+в}}{N_i}$ кг/и. л. с.	Характеристика котла: Лош. сил на 1 м² реш. $\frac{N_i}{\Sigma R}$ и. л. с./м²	N_i и. л. с. с водой $\frac{N_i}{\Sigma G_{к+в}}$ и. л. с./т	Паропроизв. котла при иск. тяге, полагая $\Delta i = 540$ кал/кг D кг/час	Паронапряж. пов. нагр. котла, полагая $\Delta i \cong 540$ кал/кг $\frac{D}{H_к}$ кг/м²/ч	Весовое напряж. решетки $\frac{B}{R}$ кг/м²/ч	Отнош. объема зан. котлом к 1 м² пов. нагрева $\frac{V_к}{H_к}$ м³/м²	Отнош. объема зан. котлом к паропроиз. котла $\frac{V_к}{D}$ м³/т	Весов. характеристики котлов: Отнош. веса котла к произв. в час пара $\frac{G_к}{D}$ кг/кг	Отнош. веса котла к 1 м² поверхн. нагр. $\frac{G_к}{H_к}$ кг/м²	Отнош. веса котла с водой к паропр. котла $\frac{G_{к+в}}{D}$ кг/кг	Отнош. веса котла с водой к пов. нагрева котла $\frac{G_{к+в}}{H_к}$ кг/кг
24	Авизо „Greif“	76	1886	Шотландские двойные	9,73	17,37	0,23	0,008	28,2	23954	41324	26,6	19,3	45,9	122,3	21,8	9,5	50	110	0,213	4,6	2,5	115	4,35	200
25	Крейсер „Irene“	76	1888	То же	19,75	35,0	0,22	0,008	29,0	57000	22000	28,5	21,2	46,0	133,3	21,7	20,0	46	110	0,22	4,8	2,85	130	4,6	211
26	„ „Prinzess Wilhelm“	76в	1891	„ „	17,76	36,75	0,23	0,008	29,7	57873	94523	28,9	18,0	47,3	125,0	21,3	23,0	49	110	0,201	4,15	2,5	122	4,1	199
27	Транспортное судно „Pelikan“	76	1891	„ „	13,34	29,73	0,26	0,008	32,5	55793	85523	38,2	19,8	57,0	125,0	17,5	9,95	25,5	110	0,19	7,43	5,58	143	8,6	219
28	Импер. яхта „Hohenzollern“	76в	1892	„ „	14,25	31,95	0,29	0,010	27,9	58539	90489	37,4	21,7	62,4	151,0	20,5	10,300	23	110	0,19	8,45	5,7	131	8,8	203
					7,25	16,85				33041	49891									0,203		6,45	148	9,7	223
29	Крейсер „Kaiserin Augusta“	76	1892	„ „	13,8	31,0	0,27	0,008	34,3	62113	93113	41,4	20,7	62,1	135	16,1	5,13	28	110	0,18	6,5	5,33	151	8,0	226
30	Крейсер „Gefion“ . . .	76	1893	„ „	11,8	30,20	0,23	0,007	32,0	47512	77712	29,1	18,7	48,2	136,3	20,7	11,613	29	110	0,185	6,35	4,3	129	7,05	203
					9,6	23,5				38193	63693						8,4			0,19		4,53	128	7,55	215
31	Броненосец „Brummer“ .	83	1883	Локомот.	5,50	12,91	0,17	0,005	70,0	21600	31600	28,8	17,2	42,1	198,4	23,7	6,5	25	300	0,104	4,2	3,3	83	4,85	121
32	Авизо „Jagd“	83	1888	„	2,9	4,8	0,25	0,002	67,1	21641	26441	21,6	4,8	26,4	263,2	37,9	8,25	32,3	300	0,11	3,5	2,62	85	3,2	103
33	Броненосец „Siegfried“ .	83	1890	„	6,2	9,65	0,21	0,004	47,0	23725	33375	27,8	8,0	28,0	222,2	35,9	10	40	500	0,107	2,75	2,37	93	3,33	132
34	Броненосец „Hagen“ . .	84	1894	„	11,9	11,1	0,22	0,006	43,0	26367	37407	23,4	9,8	33,3	196,7	30,0	9	37	500	0,141	3,75	2,9	107	4,15	152
35	Авизо „Comet“	83	1892	„	6,5	8,45	0,17	0,004	39,4	22558	31008	18,0	7,5	27,5	263,1	40,3	9,5	45	500	0,124	3,75	2,37	106	3,26	146
36	Паровой катер кл. А . .	84	1894	„	0,43	0,615	0,18	0,007	27,8	1517	2217	10,1	4,6	14,8	150,0	67,6	1350	48	500	0,072	1,47	1,12	54	1,64	80
37	„ „ кл. В . .	84	1894	„	0,37	0,57	0,20	0,007	28,2	1410	2060	17,1	4,8	17,1	141,2	58,3	1040	43	500	0,075	1,70	1,36	59	2,0	86
38	Вспомогательные котлы большого крейсера .		1877		0,532	0,520	—	—	25,8	2470	3493	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
39	Вспомогательные котлы малого крейсера . .		1877		0,248	0,31	—	—	21,3	1132	1932	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

При подсчете паропроизводительности котлов мы приняли, как рекомендует К. Буслей [1], следующие исходные данные.

Расход пара на 1 *и. л. с. ч*

Система котлов	Рабочее давление пара в сети	Система машин	Расход пара в *кг/и. л. с. ч*
Коробчатые с расположением дымогарных трубок на уровне топок	2	Простого расшир. . . .	17
Коробчатые с расположением дымогарных трубок над топками	3—4	Простого расшир. или компаунд	13
Пролетные	4—	Маш. простого расшир. или компаунд с поверхн. холодильн.	10
Пролеты	10—12	Тройного расшир. . . .	7,5
Шотландские	4—7	Компаунд с пов. холод.	10
Шотландские	10—13	Тройного расшир. . . .	6,5
Локомотивные	10—15	Тройного расшир. . . .	8

Расположение дымовой коробки в паровом пространстве котла утяжеляло всю конструкцию его, так как толщину наружных стенок коробки приходилось делать такой же, как и у стенок корпуса котла.

Новые повышенные требования к постройке и эксплоатации судовых котлов, а также перечисленные здесь конструктивные недостатки послужили главной причиной смены котлов рассмотренного типа.

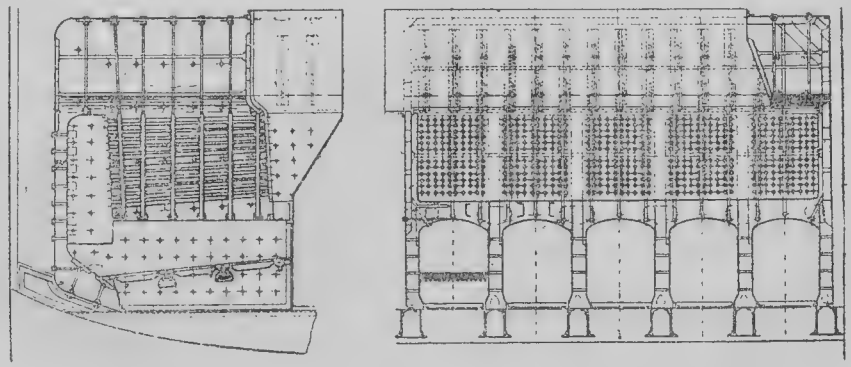


Рис. 70. Ножной коробчатый котел.

56. Ножные коробчатые котлы (Германия)

Значительно большее применение получили так называемые ножные коробчатые котлы (рис. 70). Эти котлы устанавливались на металлических судах, главным образом на броненосцах.

В конструкции котлов отсутствовали заклепочные швы в топочном

[1] Busley C. Die Schiffsmaschine. Kiel und Leipzig, 1886, und dritte Auflage, 1901.

пространстве. Дымовая коробка помещалась не в паровом пространстве котла. Представлялась возможность осматривать и ремонтировать котел со всех сторон. Каждая топка имела свою газовую коробку, и открытие дверец у одной топки не влияло на тягу в других топках. Значительные объемы топок и газовых коробок обусловливали очень малые потери от химической неполноты горения. Большое зеркало испарения и паровое пространство давали возможность парообразованию протекать спокойно. Пар получался сравнительно сухим. Большой водяной объем котла допускал неравномерность его питания, не вызывая резкого колебания давления. Это являлось удобным для эксплоатационного персонала. Котлы часто снабжались перегревателями.

Основным недостатком рассматриваемых котлов являлась невозможность получить в них пар высокого давления, так как плоские стенки плохо сопротивляются давлению пара в котле. Даже при давлении пара в котлах в 2 *ати* количество болтовых связей, скрепляющих стенки котла между собой, получалось настолько велико, что они загромождали паровое и водяное пространство котла. Это затрудняло очистку поверхности нагрева от накипи и увеличивало вес котла. Пределом повышения давления для них было 4 *ати*.

57. Овальные котлы (Англия)

Некоторого повышения давления удалось достигнуть в конце 70-х гг. в так называемых овальных огнетрубных котлах (рис. 71).

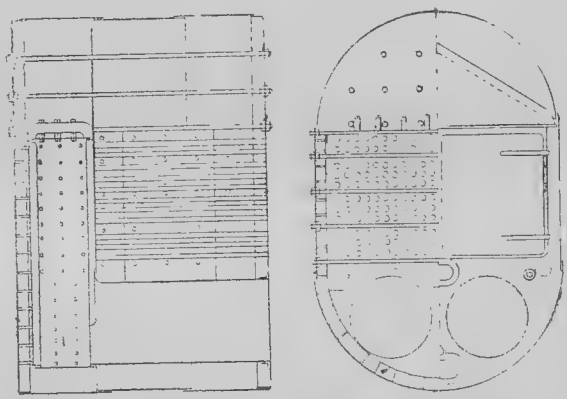


Рис. 71. Овальный котел.

Идея устройства корпуса котла овальной формы была осуществлена американцами еще в первой половине XIX в.

Овальная форма котлов позволила повысить давление пара в них до 6 *ати*, т. е. на 2 *ати* больше максимального давления в коробчатых котлах.

Количество болтовых связей не только не увеличилось, а, наоборот, уменьшилось. Постановка вертикальных болтовых связей оказалась излишней, потому что и топка и нижняя и верхняя части корпуса котла имели цилиндрическую форму.

Из других преимуществ этого типа котлов следует указать на небольшую ширину и площадь, занимаемую ими, что позволяло применять их, главным образом, для узких судов.

По данным эксплоатационных наблюдений[1] в этих котлах удалось поддерживать $\frac{B}{R} = 100$ *кг/м²ч*, а $\frac{N_i}{R} = 92$ *и. л. с./м²*. К. п. д. котла составлял лишь 56% против 60% у коробчатых котлов.

Газовая коробка у котла сделана общей на две топки (рис. 71). Такое устройство давало возможность при попеременном забрасыва-

[1] Сеннет. Паровые машины. Стр. 75, 1886.

нии угля в топки поддерживать почти равномерное парообразование в котлах.

Вес общей газовой коробки получался меньше в сравнении с весом коробок, отдельных для каждой топки. С другой стороны, устройство общей газовой коробки имело и тот недостаток, что при разрыве одной дымогарной трубки приходилось останавливать весь котел.

При чистке одной топки довольно сильно понижалась паропроизводительность всего котла. Овальные котлы не получили широкого распространения, главным образом, потому, что они давали низкий к. п. д. (56%) и их конструкции допускали лишь небольшое повышение давления пара.

Таким образом коробчатые котлы попрежнему оставались основным ведущим типом судовых котлов и в 70-х гг. XIX в.

58. Применение стали для постройки судовых котлов

Лишь к концу 70-х гг. XIX в. настоятельные требования внедрения в судовые котельные установки пара повышенного давления заставили коробчатые котлы уступить свое ведущее место цилиндрическим огнетрубным котлам. Последние в 70-х гг. начали получать все большее распространение, так как они лучше сопротивлялись внутреннему давлению в 4—5 *ати*. Давление в 4 *ати* в большинстве вновь строящихся судовых установок не смогли увеличить вплоть до 80-х гг. XIX в. Эта временная задержка обусловливалась применением в качестве котлостроительного материала железа, которое по своим качествам не допускало повышения рабочего давления в котлах выше 4—5 *ати*.

При попытках перейти этот предел приходилось чрезмерно утолщать стенки котла, чтобы они могли выдерживать гидравлическую пробу, которая производилась под давлением втрое выше рабочего.

С увеличением толщины стенок котла, помимо утяжеления веса, довольно быстро повышалась температура их. Это вызывало понижение прочности стенок котла. Железные листы, при способах производства их в то время, могли иметь шлаковые прослойки. При сильном нагревании в местах прослоек появлялись пузыри, и дело заканчивалось если не взрывом котла, то, по крайней мере, выводом его из строя для ремонта.

Длительная исследовательская работа металлургов позволила им только к 80-м гг. XIX в. найти способ изготовления мягкой стали для котлостроения. Когда стали строить судовые котлы из мягкой стали, давление пара в них повысили почти сразу до 7 *ати*.

Несмотря на это, к мягкой стали как к котлостроительному материалу относились вначале с большим недоверием. Применяли ее только на наружные корпуса котлов, а более ответственные части котла, подвергающиеся непосредственному действию пламени и газов (топки, газовые коробки и др.), делались попрежнему из железа.

От применения железа в котлостроении отказались лишь тогда, когда на практике убедились, что мягкая сталь значительно надежнее по своей крепости, чем железо.

По мере освоения и усовершенствования производства и обработки мягкой стали ее крепость повышалась, что позволило уменьшить толщину стенок котла. Котлы стали выполнять более легкими. К ним предъявлялись и менее строгие требования при гидравлических испытаниях. Железные котлы подвергались гидравлической пробе на давление, превышающее в три раза рабочее.

После того как в котлостроении начали применять мягкую сталь, пробное давление понизили до двойного. И, наконец, в 90-х годах огнетрубные котлы испытывались при давлении, равном рабочему плюс 5 *ати*.

Понижение пробных давлений дало возможность понизить расход металла за счет уменьшения толщины стенок.

59. Шотландские котлы [1]

Одним из основных технических требований к судовым силовым установкам в эпоху империализма являлось требование повышения давления пара в них.

Паросиловые установки повышенного давления в сравнении с установками низкого давления могли давать:

1) меньшие вес и габаритные размеры,
2) более высокую мощность,
3) больший к. п. д. установки.

В подтверждение приведем некоторые данные французского военного флота (табл. 19).

Для примера можно указать на броненосец «Minotaur», который в 1867 г. при испытаниях развивал скорость 14,3 узла при давлении пара в 1,75 *ати*. После постепенного изнашивания котлов давление пара в них в 1872 г. было понижено до 0,84 *ати*, и на этих испытаниях в этом же году «Minotaur» мог развивать скорость лишь 12,8 узла. Очевидно, что мощность одной и той же паросиловой установки уменьшилась вследствие понижения давления.

Выгодность применения пара высокого давления была доказана многолетними эксплоатационными наблюдениями. Однако, введение повышенного давления в судовые силовые установки долгое время тормозилось, главным образом, из-за следующих обстоятельств:

1) неосвоения работы поверхностных конденсаторов,
2) плохого качества котлостроительного материала (железо),
3) устаревшей конструкции коробчатых котлов.

Как только были освоены поверхностные конденсаторы (70-е гг.) и налажено производство мягкой стали — прекрасного котлостроительного материала (конец 70-х гг.), — представилось возможным ввести в паросиловые судовые установки повышенное давление. Для работы паром повышенного давления в первую очередь начали расширять строительство цилиндрических огнетрубных котлов. Последние применялись и для давления пара до 2 *ати*, потому что они были дешевле, легче, а технологический процесс их производства был проще. До 80-х гг. цилиндрические огнетрубные котлы, однако, не получили широкого применения, так как они в сравнении с коробчатыми котлами занимали больше места и одновременно имели меньшее паровое пространство и производили более влажный пар. Переход к широкому применению пара повышенного давления в 80-х гг. XIX в. выдвинул цилиндрические огнетрубные котлы на ведущее место в судовых котельных установках, так как конструкция ранее применяемых коробчатых котлов допускала давление пара в них максимум 4—5 *ати*.

---

[1] Busley C. Die Schiffsmaschine. T. I. Kiel—Leipzig, 1901.

TINA. Стр. 130—156. Durston. Some experiments on the transmission of heat through tube plates. 1893.

TINA. Стр. 157—166. Milton T. J. Notes on some alterations of form to which boilers are subject when under working conditions. 1893.

Таблица 19 [1]

Название судна	Год постройки	Тип машин	Давление пара в котле *ата* $P_к$	Система котлов	Площадь колосниковой решетки $м^2$ ΣR	Поверхность нагрева котла $м^2$ $\Sigma H_к$	Весовое напряжение решетки $кг/м^2 ч$ $\frac{B}{R}$	Число инд. сил на 1 *кв. м* поверхности нагрева *и. л. с.* $ч/м^2$ $\frac{N_i}{H_к}$	Часовой расход угля $кг/и. л. с. ч$ $\frac{B}{N_i}$	Полный вес механизмов вместе с котлами и водой *т* $G_{к+м+в}$	Полный вес механизмов вместе с котлами и водой, отнесенный к N_i $кг/и. л. с.$ $\frac{G_{к+м+в}}{N_i}$
Фрегат „Venus“ . . .	1865	Прот. расш. с инжекц. холод.	2,83	Низк. коробчат.	32,5	835	91,0	1,88	1,88	416	263
Брон. казематный фрегат „Freidland“ . . .	1875	Вульфа с поверхн. холод.	3,28	Высокие коробчат.	58,8	1596	98,0	2,77	1,3	961	217
Авизо II кл. „Bisson“	1875	То же	5,033	Цилиндр.	7,8	214	107,6	3,95	0,989	140	164
Брон. корвет „Bayard“	1882	„ „	5,16	„	38,64	893	137,2	5,1	1,06	662	123

[1] Carl Busley. Die Schiffsmaschine. Стр. 322, 323. Kiel, 1886.

60. Шотландский котел 70-х гг. XIX в. (Англия)

На рис. 72 показан общий вид цилиндрического судового котла, устанавливавшегося в 70-х гг. для давления пара в 4,2 *ати*. Эти котлы часто назывались шотландскими или оборотными цилиндрическими котлами, так как в них дымовые газы в газовой коробке делали поворот на 180°. Для уменьшения коррозии внутренних стенок в водяное пространство котла ставили цинковые пластинки, обозначенные на рис. 72 буквой z.

В котле почти полностью отсутствовали поперечные связи (если не считать газовой коробки). Паровое пространство было не так сильно, как у коробчатых котлов, загромождено болтовыми связями. Это позволяло более легко производить осмотр и очистку от накипи поверхностей нагрева котла. За счет уменьшения числа болтовых связей котлы получались значительно легче.

61. Шотландский котел авизо «Pfeil» постройки 1882 г. (Германия)

На рис. 72а показан шотландский котел, установленный на авизо «Pfeil» постройки 1882 г. Топки в этом котле для большей эластичности выполнены волнистыми. Подробные конструктивные и опытные характеристики для котлов этого типа приведены в табл. 18, № 17. У данного котла $\frac{G_п}{D}$, $\frac{V_к}{D}$ и $\frac{V_к}{H}$ меньше, чем у коробчатых. Весовое же напряжение решетки и паронапряжение поверхности нагрева у обоих типов котлов примерно одинаковы.

Важным преимуществом шотландских котлов являлась возможность делать стенки наружного корпуса котла более тонкими, чем у корпуса коробчатого котла, так как вследствие цилиндрической формы они лучше сопротивлялись внутреннему давлению.

Каждая топка котла имела свою газовую коробку. При открытии топочных дверец тяга в одной топке мало зависела от тяги в соседней топке.

При данном устройстве в случае появления трещины в дымогарной трубке можно буквально за несколько минут, даже не останавливая действия котла, вставить в концы поврежденной трубки особые пробки и этим ликвидировать течь.

Для выполнения этого брали две деревянные пробки, насаженные на металлический стержень, сделанный немного длиннее дымогарных трубок и с нарезкой на обоих концах. На стержень насаживалась трубка более короткая, чем дымогарная, и меньшего диаметра. С обоих концов стержня надевались шайбы с деревянными пробками. Задняя деревянная пробка имела диаметр немного меньше диаметра дымогарной трубки. На задний конец стержня навинчивали еще гайку. В таком виде прибор для закрытия дымогарной трубки был готов. Его вставляли в дефектную трубу и завинчивали гайку. Деревянные пробки под действием сжимающих усилий раздавались, создавая необходимое уплотнение.

Несколько позже был предложен более совершенный способ заглушения трубок, показанный на рис. 73. Две крайние прокладки, обращенные к газовой коробке, поставлены асбестовыми для защиты от высоких температур. Остальные прокладки резиновые. Такие запорные приспособления в эксплоатации оправдывали себя хорошо, если выдерживались определенные размеры металлических и резиновых дисков.

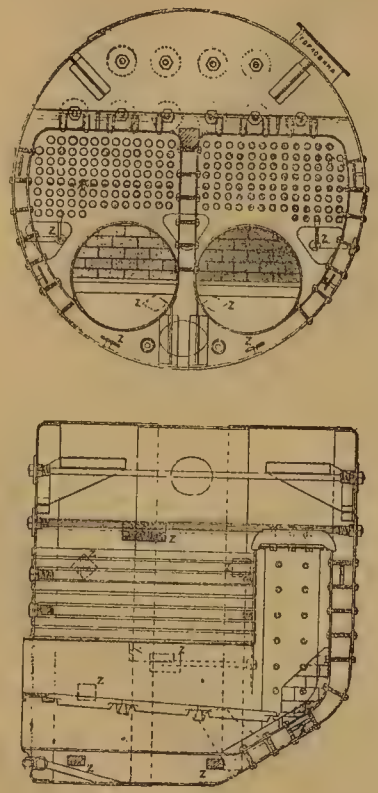


Рис. 72. Цилиндрический огнетрубный котел.

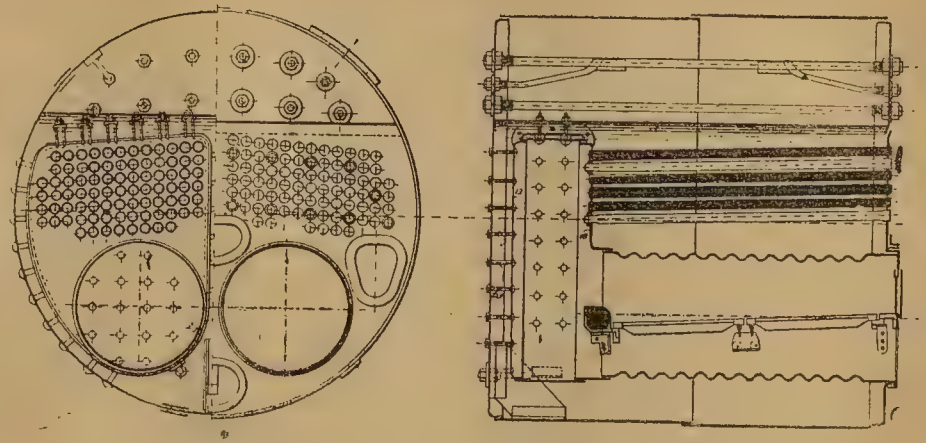


Рис. 72а. Шотландский котел, установленный на авизо „Pfeil."

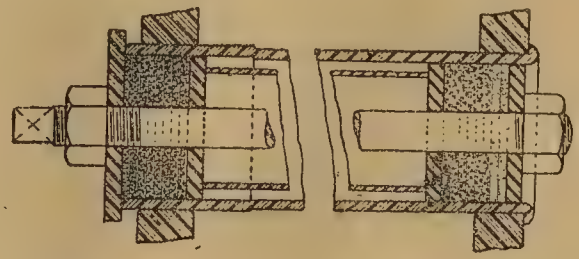


Рис. 73. Устройство для быстрого заглушения дымогарной трубки во время работы котла.

Оба металлические диска на заднем конце трубы должны были иметь диаметр на 3 *мм* меньше верхнего диаметра дымогарных трубок, металлический диск на переднем конце должен был быть меньше диаметра трубки только на 1 *мм*.

Все резиновые диски должны быть немного больше смежных с ними металлических дисков и чуть меньше диаметра дымогарных трубок. На закупоривание трубок смотрели, как на временную меру, и при первой возможности эти трубки заменялись новыми.

Самым слабым местом в конструкции котла являлось выполнение топок плоской цилиндрической формы (рис. 72).

62. Гладкие топки

Гладкая жаровая труба, будучи всегда нагрета до более высокой температуры, чем, например, соседние с ней дымогарные трубки, встречала со стороны последних сопротивление тепловому расширению. В жаровой трубе возникали чрезмерно большие термические напряжения, приводившие часто к расстройству соединений, а иногда даже и к взрыву котла.

Первые опыты над сплющиванием гладких цилиндрических топок были произведены в 1856 г. Фербеном [1]. Результаты опытов приведены в табл. 20.

Таблица 20

№ по пор.	Шов	Толщина стенки топки в *мм*	Диаметр топки в *мм*	Длина топки в *мм*	Сплющивающее усилие[2] *кг/см²*	Коэфициент сплющивания *кг/см²*
1	Внакрой	3,175	371,5	1524	8,79	
2	»	3,55	228,6	940	18,4	
3	Впритык	3,55	228,6	940	26,57	
4	Внакрой	4,0	200	7010	7,733	
5	»	6,35	476,24	1549,4	29,53	2155
6	»	8,72	850,88	91438,0	6,96	678
7	»	9,525	1066,8	10668,0	6,82	762
8	»	9,525	1066,8	7619,9	8,93	1000

Для определения величины сопротивления сплющиванию введен коэфициент сплющивания, определяемый формулой $\frac{PD}{T}$, где P — сплющивающее давление в *кг/см²*, D — диаметр топки в *мм*, T — толщина стенок в *мм*.

Данные опытов, в особенности 7 и 8, показывают, что при прочих равных условиях сплющивающие усилия топки повышаются с уменьшением ее длины.

63. Топка Адамсона

Это обстоятельство привело к мысли Адамсона изобрести топку, состоящую из коротких труб (рис. 74), которые должны соединяться

[1] Стромейер. Морские паровые котлы. Перев. с английского Голова. Стр. 199, 1895.

[2] Сплющивающим усилием принято называть такое давление на единицу площади, при котором топка сплющивается.

между собой посредством отвороченных фланцев. Между фланцами для большей плотности ставились стальные прокладки.

Весьма ценные опыты над топкой Адамсона были произведены Холлом и Русселем (Hall, Russel & Co) в 1882 г. и Гоуденом (Howden & Co) в Глазго в 1887 г.

Таблица 21

Время испыт.	Длина топки *мм*	Число колен	Длина колен *мм*	Толщина колен *мм*	Наружн. диаметр *мм*	Сплющивающее давление *кг/см²*	Коэфициент сплющивания *кг/см²*
1887	2147	4	584	по 13,9	1095	57,1	4512

Данные табл. 21 показывают, что у топки Адамсона сплющивающее усилие составляло 57,1 *кг/см²*, т. е. в 6,4 раза больше, чем в топке длиной $L \cong 7{,}62$ *м*.

64. Двойные шотландские котлы на пароходе «Lessing» постройки 1882 г. (Германия)

Как видно из рис. 74, рассматриваемый котел имел 6 топок Адамсона, по 3 с каждой стороны. Две противоположные топки имели общую газовую коробку. Котлы такого типа, у которых топки расположены с обеих сторон, называются двойными. Появление в свет двойных котлов было вызвано общей тенденцией эпохи империализма к увеличению мощности в одном агрегате; это вызвало относительное снижение веса и габаритных размеров двойных котлов. В подтверждение приводим средние данные для двойных и ординарных оборотных котлов (табл. 22).

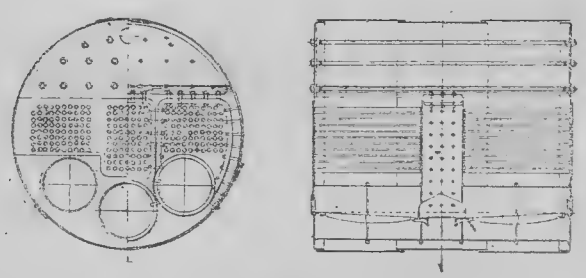


Рис. 74. Котел с топками Адамсона парохода „Lessing."

Таблица 22

	Вес котлов в *кг/л. с.*	Объем котлов *м³/л. с.*
Средние данные для 66 ординарных оборотных котлов	43	0,061
38 двойных оборотных котлов	33	0,048

Существенным недостатком двойных цилиндрических котлов по сравнению с ординарными является их большой по абсолютной величине вес и габаритные размеры. Котлы представляли много трудностей при передвижении их, а также во время установки и капитального ремонта. Ввиду их большей мощности, двойные котлы всегда устанавливаются на корабле в меньшем количестве, чем ординарные. Они допускают меньшую дробимость мощности корабля, что в то время являлось недостатком для военных кораблей. Двойные котлы получили более широкое распространение только в коммерческом флоте.

Характеристики двойных оборотных котлов, приведенные в табл. 18, § 25—31, указывают на большие преимущества их в сравнении с коробчатыми и американскими судовыми котлами первой половины XIX в. Паронапряжение колеблется в весьма больших пределах. Это объясняется, главным образом, различной степенью загрязнения внутренних и наружных поверхностей нагрева. При одинаковых условиях более чистые поверхности нагрева позволяют получать и более высокие паронапряжения.

Одновременно из таблицы видно, что паронапряжения в огнетрубных котлах более пятидесяти лет стоят примерно на одинаковом уровне и не дают никаких признаков роста.

65. Циркуляция воды в огнетрубных котлах

Основная причина длительного застоя в росте $\frac{D}{H_к}$ объясняется тем, что интенсивность теплоотвода от поверхностей нагрева в огнетрубных котлах достигла своего максимального предела еще в первой половине XIX в. Дальнейший ее рост ограничивался наблюдающимся в огнетрубных котлах взаимным торможением движения воды и пара, или, как говорят, плохой циркуляцией в котле. Паровые пузырьки, образующиеся на поверхности дымогарных трубок, при подъеме встречают со стороны верхних дымогарных трубок большие препятствия. Часть паровых пузырьков направляется, как показано (рис. 74a, 74b) стрелками, вверх по трубным коридорам, но и здесь их подъем тормозится водой, опускающейся по этим коридорам. В результате часть паровых пузырьков снова отталкивается к дымогарным трубкам. Здесь они вместе со вновь образующимися пузырьками задерживаются на некоторое время. Их отделению препятствует вода, стремящаяся спуститься вниз.

Дымогарные трубки оказываются постоянно покрытыми более или менее густой пеленой паровых пузырьков. Это является основной причиной плохого теплоотвода от поверхностей нагрева. Опытными наблюдениями установлено, что передача тепла через стенку от газа к пару в несколько раз ниже, чем от газа к воде. Отсюда вывод, что циркуляция будет протекать лучше в тех огнетрубных котлах, у которых менее густая сеть дымогарных трубок и более просторные трубные коридоры. Итти на разрежение сети дымогарных труб для улучшения циркуляции воды невыгодно, так как при прочих равных условиях это привело бы к увеличению веса и габаритных размеров котла.

Там, где дымогарные трубки расположены весьма близко друг к другу, паровые пузырьки задерживаются на трубках более продолжительное время. Ухудшается теплопередача, появляются местные перегревы и даже разрывы трубок. Почти все котлостроительные за-

воды располагали дымогарные трубки в затылок, что давало наиболее просторные трубные коридоры, а стало быть, и улучшало условия циркуляции воды. Некоторые заводы в течение почти всего XIX в. пытались применять шахматное расположение трубок (рис. 74b), что в сравнении с затылочным расположением (рис. 74a) позволяло увеличить поверхность нагрева в одном котле).

Съем пара из-за ухудшенной циркуляции в котле часто получался даже меньше, чем у котлов с затылочным расположением труб, несмотря на то, что последние имели меньшую поверхность нагрева [1].

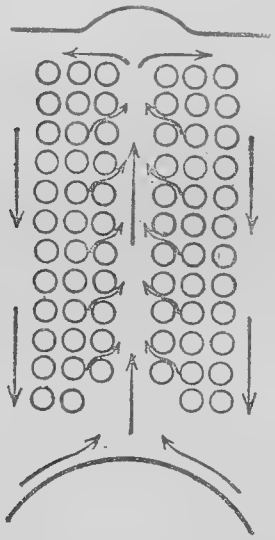


Рис. 74a. Схема циркуляции воды в огнетрубных котлах.

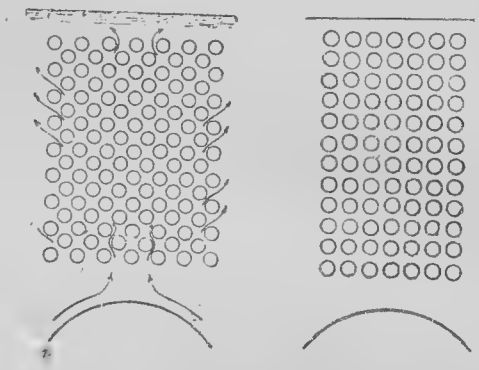


Рис. 74b. Схема циркуляции воды в огнетрубных котлах.

66. Дымогарные трубки

Дымогарные трубки в котле парохода «Lessing» выполнены железными, тогда как все остальные части котла сделаны из мягкой стали.

Основная причина применения железных дымогарных трубок объясняется их небольшой стоимостью по сравнению со стальными трубками.

В начале 90-х гг. XIX в. Английское адмиралтейство начало применять почти исключительно стальные дымогарные трубки, мотивируя это тем, что вынутые из котла стальные трубки можно поставить в котел вторично, чего нельзя было сделать с железными трубками.

Рис. 75. Приспособление для выемки дымогарных труб.

Для легкости выемки и вставки трубок через фронтовую трубную доску задние концы трубок в судовых котлах делались меньшего диаметра, чем передние. На рис. 75 показано приспособление для вынимания трубок.

Ниже мы приводим описание котла, у которого почти все части уже сделаны из мягкой стали.

---

[1] W. Cowles. Paper read before the American Society of mechanical engineers. New-York, 1886.

67. Двойной шотландский котел парохода «Saale» и топка Фокса (Германия)

На рис. 76 показан двойной цилиндрический огнетрубный котел постройки 1886 г., установленный на немецком почтовом пароходе «Saale».

Отличительной особенностью этого котла является волнистая топка, сделанная по патенту Фокса (Fox). Топками Фокса снабжали и ординарные цилиндрические котлы (рис. 76а). Топка Фокса в начале своего появления (1879 г.) получила широкое применение в судовых котельных установках, вытесняя даже топки Адамсона, несмотря на их большую по сравнению с гладкими топками сопротивляемость сплющиванию. У топки Адамсона вследствие наличия большого количества колец поверхность нагрева меньше, чем в гладких топках.

При уменьшении же числа колец приходилось утолщать стенки топки, чтобы не понизить прочности, а итти на утолщение стенок топки было невыгодно, так как это вызывало увеличение ее веса, понижение паропроизводительности поверхности топки и увеличение температуры ее стенок, что являлось наиболее опасным.

Топка же Фокса в этом отношении имела несравненные преимущества. Волнообразная форма ее лучше сопротивлялась термическим напряжениям, и стенки топки при прочих равных условиях могли делаться тоньше. Поверхность же нагрева топки ввиду ее волнистой формы при одинаковых длине и диаметре больше адамсоновской.

На критический взгляд того времени топка Фокса казалась вполне совершенной. Однако, эксплоатационные наблюдения над работой топки выявили ее очень важный недостаток: во впадинах, образуемых внутренними волнами, осаждались ил и накипь. Последняя в этих частях так сильно прикипала к стенкам, что иногда ее не удавалось удалить никаким способом. Накипеобразования во впадинах особенно опасны, так как топки в этих частях больше всего подвергаются действию пламени и часто пережигаются. Нередко по этой причине происходили выпучивания топок и даже взрывы котла.

Один такой случай произошел на грузовом пароходе в 3000 *т*, оборудованном двумя ординарными оборотными котлами[1]. В каждом котле было по 3 топки. При входе этого парохода в порт неожиданно в средней топке выпучилось нёбо. При осмотре котла оказалось, что впадины топки Фокса были заполнены грязью.

Этот недостаток послужил основной причиной сокращения применения топок Фокса с начала 80-х гг. XIX в.

Перейдем к рассмотрению эксплоатационных и конструктивных характеристик рассматриваемого котла.

Как показывает табл. 18, п. 24—30, паронапряжение поверхности нагрева у двойных цилиндрических котлов при давлении пара от 7 до 12 *ати* колеблется в пределах от 29 до 23 *кг/м²ч* против 50—46 у котлов этого же типа, но работающих при давлении пара до 7 *ати*. Более низкое паронапряжение у котлов повышенного давления объясняется невозможностью увеличивать форсировку работы котла из-за неприспособленности его конструкций для работы на повышенном давлении пара. При повышении нагрузки котла в заклепочных швах и трубных досках появляются течи.

---

[1] Голов. Повреждения на судах. Стр. 9, СПБ, 1897 г.

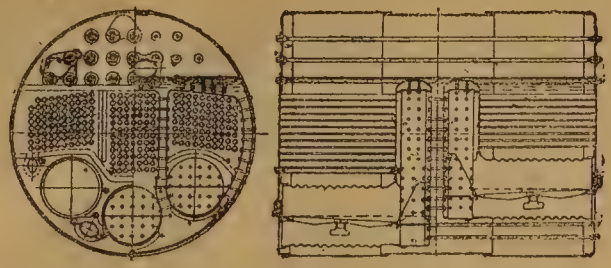


Рис. 76.

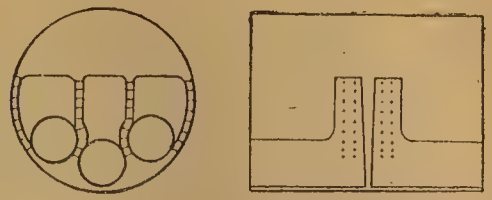


Рис. 77. Крепление газовых коробок.

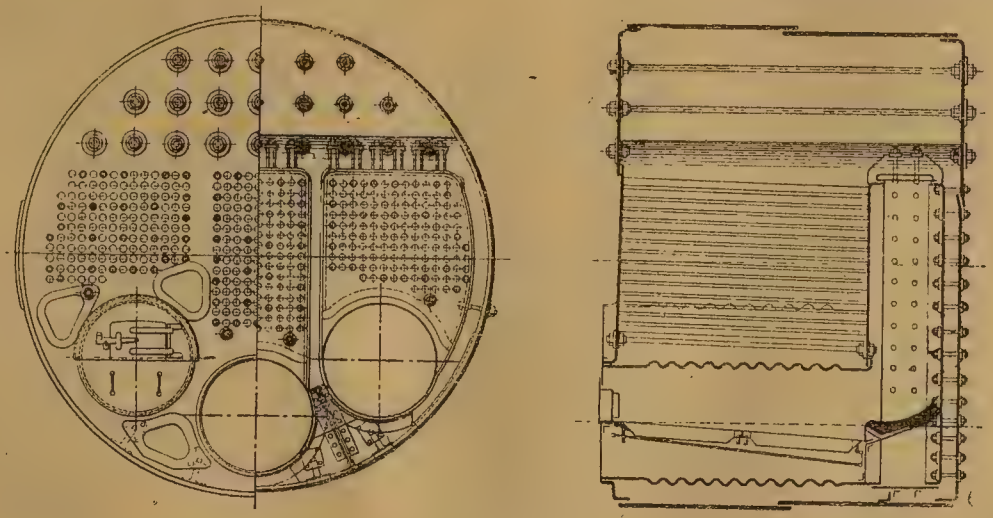


Рис. 76, 76а. Шотландский котел с топками Фокса парохода „Saale“ 1886 г. и крейсера „Wörth“.

68. Деформации в огнетрубных котлах

Постараемся проанализировать основные причины, вызывающие течи в вышеупомянутых частях котла. Все части находящегося в действии котла подвергаются напряжениям не только от внутреннего давления, но и от различных температур, при этом более нагретые части расширяются, встречая сопротивление менее нагретых. Эти напряжения вызывают искривление стенок котла и образование течи. Наибольшему искривлению подвергаются корпус и газовые коробки котла. Если бы корпус котла сопротивлялся только внутреннему давлению, то при правильном расчете никаких изменений не наблюдалось бы, но так как на него действует напряжение, вызываемое в связях газовых коробок, то он искривляется. При связывании газовых коробок с корпусом котла только боковыми стенками (рис. 77) в корпусе котла может иметь место увеличение вертикального диаметра его и уменьшение горизонтального.

Английский инженер Мильтон (J. K. Milton) в начале 90-х гг. XIX в. провел очень много интересных опытов в этом направлении (табл. 23 на стр. 142, 143).

Данные опытов Мильтона[1] показывают, что изменение формы корпуса котла увеличивается с повышением пробного или рабочего давления в котле.

Передние и задние стенки стремятся выпучиться в наружную сторону, главным образом, из-за того, что суммарная площадь трубных досок у фронтовых стенок котла больше, чем вся площадь трубных досок газовых коробок.

Удельное давление в котле одинаково во всех направлениях, поэтому при неравных площадях силы, противоположно действующие на трубные доски, вызовут удлинение газовых коробок.

Наибольшее удлинение газовой коробки четырехтопочного двойного котла, по данным Мильтона (табл. 24 на стр. 144, 145), при пробном давлении в 22,5 *ати* составляло 3,2 *мм*.

Боковые стенки, связанные с корпусом котла посредством болтов, часть своего напряжения передают на болты; последние в свою очередь заставляют искривляться корпус котла. Вслед за изменением корпуса котла последует легкое вдавливание стенок газовой коробки внутрь. Максимальное продавливание боковых стенок коробки получалось у средних коробок в самом узком месте — на уровне центров крайних топок.

В некоторых случаях продавливание средних коробок доходило до 6—12 *мм*. Такое большое смещение стенок объясняется в основном тем, что в этом уровне крайние коробки имеют швы, соединяющие боковые стенки коробки с их донышками. Эти швы сильно сопротивляются продавливанию коробок и переносят свои напряжения на среднюю коробку, отчего последняя вызывает большие напряжения в трубной решетке.

Под действием напряжения расстраивается развальцовка трубок в трубной доске, и появляется течь. В трубных решетках средних газовых коробок течи появляются гораздо чаще, чем в крайних коробках.

Все эти искривления стенок корпуса и коробок имеют огромное влияние на плотность соединения швов и прочность котла. Течи

[1] TINA. Стр. 157—166. Milton. 1893.

Таблица 23[1].

	Размерность	Котел *A*	Котел *B*	Котел *C*
Диаметр котла (средний)	*мм*	4292	4572	4648
Длина котла	„	3048	2972	5172
Рабочее и пробное давление	*ати*	11,25; 22,5	5,625; 11,25	11,25; 22,5
Диаметр топки (наружный)	*мм*	940	1067	1194
Длина топки по наружной стороне решетки	„	2134	1981	2032
Число топок в котле	шт.	3 Пурвеса	3 гладких	6 Фокса
Число газовых коробок в котле	„	3	3	3, каждая для 2 топок
Число вертикальных рядов связей на боковых сторонах коробки	„	2	2	4
Толщина корпусных котлов	*мм*	28,6	17,5	34,1
Толщина стенок газовой коробки	„	15,1	12,7	22,2
Толщина стенок нижней части газовой коробки	„	22,2	12,7	22,2
Толщина топочных листов	„	11,9	12,7	13,5
Укрепление верхней части газовой коробки	—	скобы	сферич. верх скобы	
Укрепление нижней части газовой коробки	—	без крепления	крепление I-образной сталью, но не соед. с корпусом котла	без крепления

	Замеченные изменения размеров					
	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*
	в *мм*					
Уменьшение горизонтального диаметра корпуса котла	0	0,8	0	0,8	5,6	10,3
Увеличение вертикального диаметра корпуса	1,6	3,2	2,4	4	2,4	6,4
I. Уменьшение ширины средней газовой коробки						
1. На уровне центра котла						
а) Ближе к задней стенке (котел *C* ближе к одной из решеток)	0,8	1,6	0	1,6	2,4	4

[1] Русанов. Заметки по котельному делу в Англии. Стр. 81—83. СПБ, 1894 г.

Продолжение табл. 23

	Замеченные изменения размеров					
	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*	под раб. давлением в 11,25 *ати*	под пробным давлением в 22,5 *ати*
	в мм					
б) В средине	0	0,8	0,8	1,6	2,4	4,8
в) Ближе к трубной решетке	0,8	1,6	1,6	2,4	0,8	3,2
2. В узкой части						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной из решеток)	2,4	4	1,6	2,4	4	8
б) В средине	2,4	4,8	1,6	3,2	5,6	12,7
в) Ближе к трубным решеткам	1,6	3,2	0,8	2,4	3,2	8
3. Цилиндрические нижние части						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной решетке)	0	0,8	0	0	1,6	5,6
б) В средине	0,8	1,6	0	0,8	4,0	7,2
в) Ближе к трубной решетке	0,8	2,4	0,8	1,6	2,4	5,6
II. Уменьшение ширины правой коробки						
1. На уровне центра котла						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной из решеток)	0	0,8	0	0	0	1,6
б) В средине	0	0	0	0	1,6	4,8
в) Ближе к трубной решетке	0,8	1,6	1,6	0,8	0,8	2,4
2. В цилиндрической нижней части						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной из решеток)	0	0	0	0,8	1,6	3,2
б) В средине	0	0	0	0	1,6	5,6
в) Ближе к трубной решетке	0	0	0	0,8	1,6	3,2
III. Уменьшение ширины левой коробки						
1. На уровне центра котла						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной из решеток)	0,8	1,6	0,8	0,8	2,4	2,4
б) В средине	0	0,8	0,8	1,6	2,4	4,0
в) Ближе к трубной решетке	0,8	1,6	0,8	1,6	0,8	2,4
2. В цилиндрической нижней части						
а) Ближе к задней стенке (котел *С* ближе к одной из решеток)	0,8	0,8	0	0	0	0,8
б) В средине	0	0	1,6	2,4	0,8	1,6
в) Ближе к трубной решетке	0,8	0,8	1,6	2,4	0,8	1,6

Табли

ца 24[1]

	Размерность	Котел *D*	Котел *E*	Котел *F*	Котел *G*	Котел *H*	Котел *I*	Котел *J*	Котел *K*	Котел *L*
Диаметр котла (средний)	*мм*	4039	3886	4267	3967	4420	4470	4140	3962	3810
Длина котла	„	3048	5055	4877	5182	5486	5182	5258	4877	5182
Рабочее и пробное давление	*ати*	10,55 21,1	11,25 22,5	11,25 22,5	12,65 25,3	10,55 21,1	12,3 24,6	11,25 22,5	11,25 22,5	12,65 25,3
Число топок в котле	шт.	3 гладк.	6 Фокса	6 Фокса	6 Пурвеса	6 Пурвеса	6 Пурвеса	6 Пурвеса	4 Пурвеса	4 Адамсона
Диаметр топки наружный	*мм*	914	991	1030	980	1092	1080	1016	1092	1092
Длина топки по наружной стороне решетки	„	2007	2032	1880	2134	1880	2106	2057	1943	2087
Число газовых коробок	шт.	3	3, каждая для 2 топ.	3, каждая для 2 топ.	3, каждая для 2 топок	6	3, каждая	для 2 топок	2, каждая	для 2 топок
Число вертикальных рядовых связей по боковым стенкам газовой коробки	„	2	3	4	4	3	3	3	3	4
Толщина корпусного листа	*мм*	28,6	26,2	31,7	—	31	—	33,3	26,2	27,8
Толщина стенок газовой коробки	„	14,3	15,9	15,9	—	14,3	15,1	18,3	15,9	15,9
Толщина нижнего листа коробки	„	15,9	19	20,6	—	33,3	19,0	19,0	20,6	6,35
Толщина топочного листа	„	15,9	11,1	11,9	—	11,9	19	11,9	13,5	15,9
Укрепление верха газовой коробки		скобы	скобы	скобы, попеременно связанные с корпусом	скобы, скрепл. своей сред. с корпусом котла, оставляя концы свободн.	со сферич. верхней короб., скреплен. между собой	скобы, скрепл. как в котле	скобы	скобы	скобы
Укрепление низа газовой коробки		без скрепления	—	скрепление листовыми связями	как в котле *E*	укрепл. угловой сталью	⊥-обр. полосами, связ. с корпусом	без скрепления	2 ⊥-образн. полосами	без скрепления

Замеченные изме

нения размеров под давлением в *ати*

	Пробное 21,09 *мм*	Рабочее 11,25 *мм*	Пробное 23,2 *мм*	Рабочее 11,25 *мм*	Пробное 28,5 *мм*	Рабочее 12,65 *мм*	Пробное 25,3 *мм*	Пробное 21,09 *мм*	Пробное 24,6 *мм*	Пробное 22,5 *мм*	Рабочее 11,25 *мм*	Пробное 22,5 *мм*	Рабочее 12,65 *мм*	Пробное 5,3 *мм*
Уменьшение горизонтального диаметра корпуса котла	3,2	3,2	6,4	—	9,6	3,2	5,95	13,5	—	—	4,76	6,35	3,18	5,16
Увеличение вертикального диаметра корпуса котла	3,2	—	—	—	—	1,6	2,4	—	—	—	4	7,2	4,76	8,73
Среднее на уровне центра котла посредине	1,19	2,38	4,0	—	—	0,8	2	—	—	3,18	—	—	—	—
Уменьшение ширины газовой коробки: Крайнее на уровне центра котла посредине	1,6	—	—	—	—	1,19	2	—	—	3,18	—	3,18	1,6	4,0
Среднее в узкой части посредине	6,35	4,8	8,73	4,8	7,14	—	—	—	5,95	9,53	—	—	—	—
Среднее ближе к трубной решетке	—	—	—	1,6	2	—	—	—	—	8	—	—	—	—
Среднее к задней части	—	—	—	2,4	2	—	—	—	—	6,35	—	—	—	—
В цилиндрической нижней части посредине	0	2,4	8	2,4	5,6	—	—	—	5,56	0	—	—	—	—
Крайней то же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,18	—	3,18	—	—
Ближе к решетке	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,18	—	—	—	—
Ближе к задней стенке	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,18	—	—	—	—
Увеличение длины газовой коробки между трубной решеткой и задней стенкой	2	1,2	—	—	1,6	1,6	2,4	2	—	—	—	3,2	—	1,6

[1] Русанов. Заметки по котельному делу в Англии. Стр. 84—87. СПБ, 1894.

появляются не только в трубных решетках коробок, но и в фронтовых трубных досках, особенно подвергающихся действию пламени

Появление течи в передней трубной доске вследствие ее выпучивания наблюдается реже, чем в решетках газовых коробок.

Заметим, что на появление течи в трубных досках может влиять также и недостаточное число продольных связей, соединяющих переднюю и заднюю трубные доски.

Главнейшей причиной появления течи в местах развальцовки труб является периодическое открытие топок для чистки их и загрузки топлива. Трубные решетки и концы дымогарных трубок подвергаются действию изменяющихся температур.

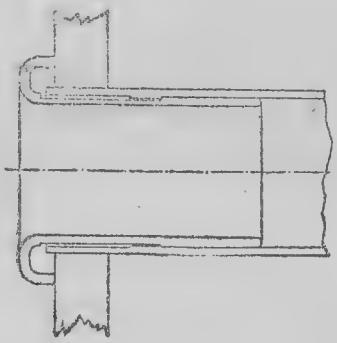


Рис. 78.

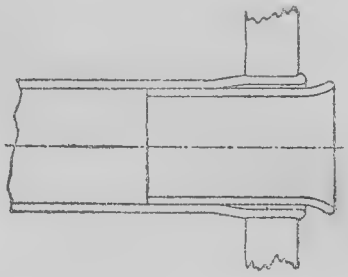


Рис. 78a.

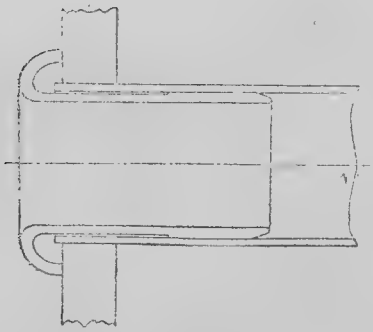


Рис. 78b.

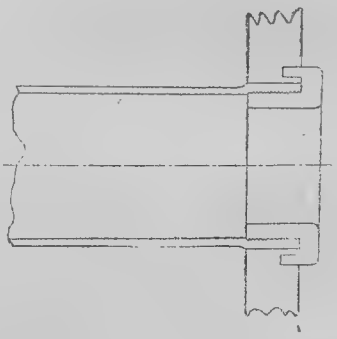


Рис. 78c.

Различные типы наконечников.

69. Защитные наконечники для огнетрубных котлов

Стремление свести эту причину к минимуму побудило некоторых английских изобретателей устанавливать в концах дымогарных трубок защитные наконечники, предохраняющие трубную доску и концы дымогарных трубок от непосредственного периодического действия высоких температур.

Из всех типов предложенных наконечников (рис. 78, 78a, 78b, 78c) наилучшие результаты дал наконечник, показанный на рис. 78b.

После удовлетворительно проведенного испытания этих наконечников их решили поставить на броненосце «Thunderer» в шеститопочные котлы с общей газовой коробкой. До установки наконечников эти котлы очень сильно текли в трубной решетке газовой коробки, даже при давлении воздуха в 20 *мм* вод. ст.

Когда поставили наконечники и довели давление воздуха до 30 *мм*, то после восьмичасовой пробы оказалось, что дали течь лишь несколько швов в газовой коробке (заклепки, боковые связи из-под гаек). Дымогарные же трубки течи не имели. Машины развивали мощность в 5900 *и. л. с.* вместо полагавшихся 5500 *и. л. с.*

При увеличении давления воздуха до 50 *мм* вод. ст. мощность машин удалось повысить до 7066 *и. л. с.*, причем из 3000 дымогарных трубок потекло только 10, и то незначительно.

После этих испытаний броненосец отправили из Англии на остров Мадейру. Во время этого рейса котлы работали с наконечниками при нормальной нагрузке 11 дней. Мощность, развиваемая машиной, была равна 4400—4700 *и. л. с.* При осмотре котлов после возвращения броненосца оказалось, что один наконечник выпал и потекли соответствующие ему три трубки, и также одна смежная с ними. Все наконечники были покрыты толстым слоем натара. Из 3000 наконечников 30 шт. оказались совершенно негодными.

Наконечники были установлены и на многих других судах в котлах различных типов. Все опыты дали хорошие результаты.

Наконечники выявили при эксплоатации и свои отрицательные стороны. Теплопередача в частях трубок, покрытых наконечниками, была уменьшена почти до нуля. Кроме того, наконечники увеличивали собой газовое сопротивление. В связи с этим их применение постепенно уменьшалось.

Одновременно велась работа по улучшению как качества соединений в трубной решетке, так и материала для последней. Эта проблема не разрешена еще и в наши дни. В настоящее время в СССР ведется экспериментальная работа по замене развальцовки трубок в трубной решетке сваркой их.

С момента применения болтовых связей и газовых коробок эксплоатационному персоналу судовых котельных установок приходилось уделять очень много забот устранению течи в болтовых связях и фланцах соединений топок с газовой коробкой.

Топка под действием высоких температур факела стремится расшириться, тогда как газовая коробка, благодаря своему удлинению, сжимает топку.

Во фланцевых соединениях топки вызываются напряжения, вредное действие которых усиливается от изменений температуры стенок и давления пара в котле. Под действием этих напряжений во фланцевых соединениях и в топках появляются трещины. Образование последних чаще наблюдается у котлов повышенного давления, так как в них колебание давления и температуры, как правило, бывает больше, чем у котлов низкого давления.

Для уменьшения изменения первоначальной формы частей котла некоторые заводы начали практиковать в 90-е гг. XIX в. почти круговое сцепление газовых коробок со стенками котла.

Сопротивление продавливанию верхней стенки газовой коробки при этом воспринимают на себя не скобы, как во всех ранее рассмотренных котлах, а прутковые связи. Такая связь коробок оправдала надежды конструкторов на уменьшение изменения формы газовых коробок.

По данным Мильтона, в двойном котле с 6 топками при рабочем давлении в 12 *ати* наблюдалось уменьшение ширины средней газовой коробки на уровне: центра котла на 0,8 *мм* и крайней — на 1,2 *мм*, тогда как средняя газовая коробка у котла с шестью топками Фокса, укрепленная вверху скобами, дала уменьшение ширины коробки на

2,4 *мм*, т. е. в три раза больше, чем в рассматриваемом котле[1]. Прутковая связь коробок встречалась чаще у двойных котлов, потому что у ординарных она сильно затруднила бы очистку и осмотр задних стенок коробки.

70. Котлы императорской яхты «Hohenzollern», 1892 г., и топка Пёрвеса, 1892 г. (Германия)

Отличительной особенностью котла яхты «Hohenzollern» (рис. 78d) является соединение в одну газовую коробку двух смежных топок, а не противоположных, как у вышерассмотренных котлов.

Такое устройство коробок имеет недостаток, так как повышает их вес в котле, но зато они увеличивают радиационную поверхность нагрева котла, паровое напряжение которой в несколько раз выше, чем у конвекционной поверхности нагрева дымогарных трубок.

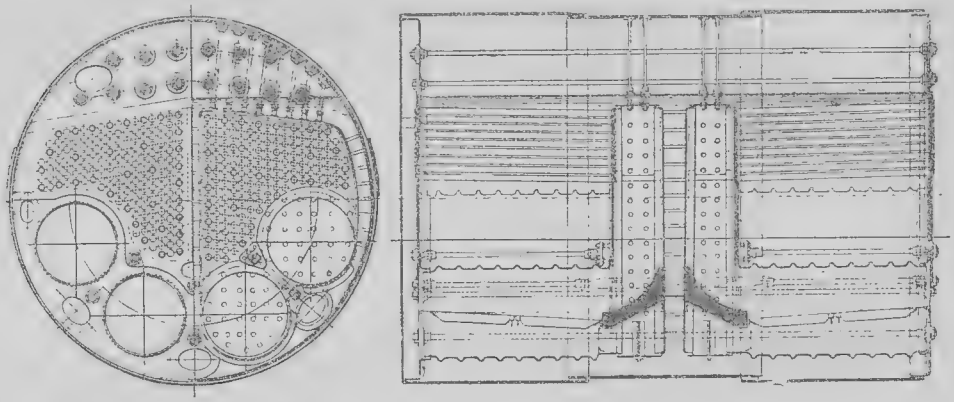


Рис. 78d. Котел яхты „Hohenzollern".

Разница в парообразовании радиационной и конвекционной поверхностей нагрева была установлена еще Стефенсоном в 1830 г., который специально для этой цели провел опыты с локомобильным котлом. Его котел был разделен по топочной трубной решетке на две части так, что представлялось возможным производить отдельно учет испаряемой воды поверхностями топки и поверхностями дымогарных трубок.

По данным опытов Стефенсона, паронапряжение 1 $м^2$ поверхностей топок, воспринимающих тепло, излучаемое факелом, в три раза превышало паронапряжение 1 $м^2$ поверхностей дымогарных трубок.

В рассматриваемом котле также обращает на себя внимание устройство порогов за колосниковой решеткой. Пороги эти служили для уменьшения выпадения золы при повороте газов и для удобства ее удаления из газовой коробки.

Топки котла построены по патенту Пёрвеса (Purves), заявленному в 1880 г. Они так же, как и топки Фокса, очень быстро получили широкое распространение в судовых установках.

Устранение неравномерности накипеобразования и осаждения шлама на поверхностях топки Пёрвеса и легкость удаления осадков с поверхностей топки было главной целью изобретателя. Он достиг этого, поместив скрепляющие ребра в водяное пространство котла.

[1] Русанов. Заметки по котельному делу в Англии, стр. 10, СПБ, 1894.

Практика работы топок Пёрвеса показала, что эта главная задача изобретателя была им выполнена сравнительно хорошо. По удобству очистки от накипи рассматриваемые топки оказались почти одинаковыми с гладкими топками.

Однако, топка Пёрвеса хуже, чем топка Фокса, сопротивлялась сплющиванию. Кроме того, неравномерность сечения и плохая гибкость продольных плоских участков трубы вызывали трещины по окружности у основания ребер или в загибах фланцев заднего конца топки.

71. Топка Мориссона

Недостатки топок Фокса и Пёрвеса были учтены Мориссоном при изобретении им нового типа топки. В своей топке Мориссон позаимствовал из топок Фокса равномерность распределения материала, дающую наибольшее сопротивление сплющиванию. От топки Пёрвеса была взята идея защиты укрепляющих волн от действия пламени путем помещения их в водяном пространстве.

Вся поверхность в топке Мориссона подвергалась действию высоких температур факела почти равномерно, поэтому в каждый данный момент термические напряжения в омываемых факелом частях топки получались примерно одинаковыми.

Небезынтересно привести требования, сформулированные Мориссоном для топок огнетрубных котлов повышенного давления [1].

«1. Топка должна иметь наибольшую паропроизводительность и наименьшую среднюю температуру между двумя ее сторонами.

2. Материал ее должен быть расположен так, чтобы дать наибольшее сопротивление сплющиванию с надлежащей гибкостью в прямолинейном направлении.

3. Сопротивление топки действующим на нее силам должно быть повсюду равномерным, в предупреждение местных оседаний или выпучиваний.

4. Материал топки должен быть одинаковой толщины, чтобы расширение ее было равномерное повсюду, но не местное.

5. Форма ее должна быть такова, чтобы напряжения, происходящие от чрезмерных изменений температуры, производящих трещины, были распределены по всей длине, а не сосредоточивались только в некоторых местах.

6. Топка не должна иметь узких впадин или выступов, способствующих скоплению осадков, пережогу материала и уменьшению паропроизводительной способности.

7. Укрепляющие выступы должны помещаться с наружной стороны, дабы защищать топку от действия пламени.

8. Топка должна иметь такую форму, чтобы чистка ее вообще, исправление и перестановка выполнялись легко.

9. Материал топки должен быть более благонадежным во время обработки его и наиболее выдерживающим чрезмерные изменения температур; другими словами, материал должен быть наилучшего качества, чтобы он мог выдерживать все случайности при обработке его котельными мастерскими и изменениях температуры самой топки во время ее действия и чтобы прочность топки получалась через соответствующую форму расположения материала, а не от его крепости».

---

[1] Цитируем по Русанову, стр. 12—13.

Содержание этих положений, выдвинутых Мориссоном, доказывает, что уже в 80-х гг. XIX в. к производству топок судовых котлов предъявлялись весьма высокие требования, которые косвенно указывают на сравнительно высокий уровень котельной техники.

Несмотря на то, что эти требования были довольно высоки, они в топке Мориссона удовлетворялись сравнительно неплохо.

Заканчивая описание котлов с топками Мориссона, необходимо отметить целый ряд интересных конструктивных преимуществ этой топки, как, например:

1. Легкость выемки топки Мориссона из котла, если это требуется при капитальном его ремонте.

2. Устройство огнеупорного свода для защиты от непосредственного действия пламени шва, соединяющего топку с газовой коробкой. Такой же огнеупорной стенкой защищена от языков пламени и задняя стенка газовой коробки.

В топке осуществлен дополнительный подвод воздуха в газовую коробку. Предполагалось, что такое устройство позволит осуществить в газовой коробке более полное дожигание газообразных продуктов неполного горения. Ввод вторичного воздуха в газовую коробку для уменьшения дымности горения получил широкое применение в 70-х и 80-х гг. в английском флоте. Но уменьшение дымности горения нередко происходило за счет понижения паропроизводительности котла.

Ввод вторичного воздуха в газовую коробку не позволял достигнуть совершенного перемешивания воздуха с газами ввиду близости дымогарных трубок. Неиспользованный воздух устремлялся в дымогарные трубки, увеличивая тем самым коэфициент избытка воздуха, что в конечном счете снижало к. п. д. котла. Начиная с 90-х гг. XIX в., это устройство постепенно выходит из употребления.

После топки Мориссона был изобретен и ряд других топок, которые оказались менее надежными в работе, а потому мы их не рассматриваем.

72. Котел парохода «St. Rognwald» постройки 1884 г. (Германия)

На рис. 79 показан наиболее употребительный тип котлов для больших грузовых пароходов английского флота[1]. Данный котел установлен на пароходе «St. Rognwald». Особенностью этого котла является расположение сухопарника на котле. Это устройство дало возможность в значительной степени уменьшить влажность производимого пара.

Однако, помещение сухопарника на котле имело тот существенный недостаток, что требовало увеличения высоты котельной. В связи с этим сухопарник не всегда применялся. Чтобы не допускать чрезмерного увеличения влажности пара, практикой выработалось требование не доводить уменьшения высоты парового пространства ниже ¼ диаметра корпуса котла.

В данном котле интересно также устройство верхней части газовой коробки. Такая конструкция уменьшает количество заклепочных швов в газовой коробке на один, что нельзя не признать за преимущество котла, так как каждый заклепочный шов, особенно подвергающийся действию высоких температур топочных газов, представляет опасность появления течи в нем.

---

[1] A. Jamieson. A text book on steam and steam engines. Стр. 316, London, 1886.

Оригинальна здесь и система укрепления верхних частей коробки, осуществляемая посредством стальных листов. Ее преимуществом является меньший вес связей по сравнению, например, со скобами, хотя скобы выгодны тем, что могут быть вынуты без особого труда в случае необходимости.

Из других преимуществ котла следует указать на короткую топку. Такие топки особенно ценятся эксплоатационным персоналом из-за легкости обслуживания их.

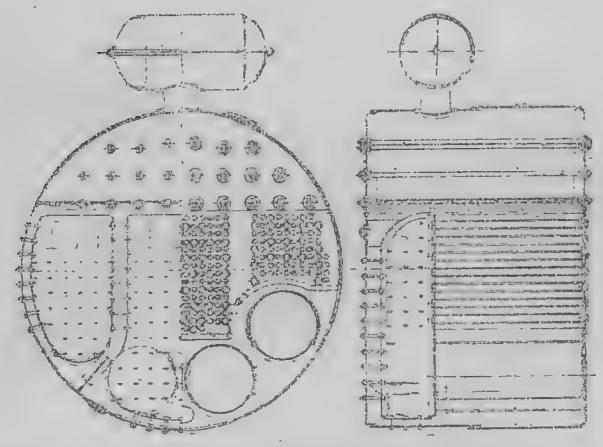


Рис. 79. Котел парохода „St. Rognvald" с сухопарником 1884 г.

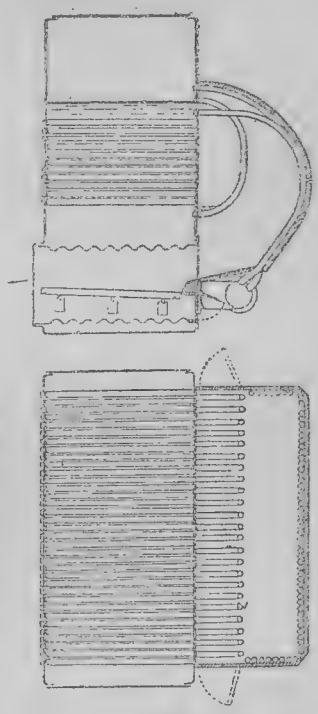


Рис. 79а. Котел Солиани.

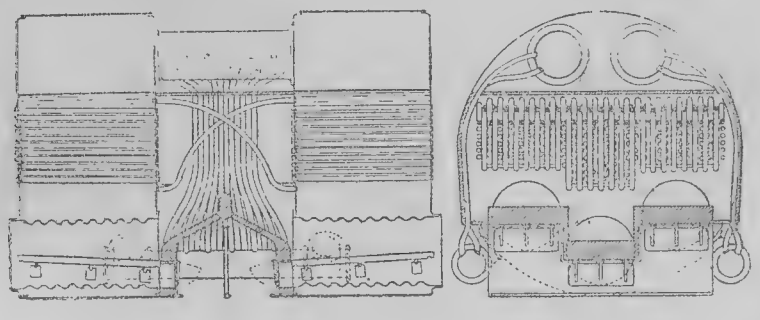


Рис. 79b. Котел Солиани.

Одним из основных недостатков всех вышерассмотренных огнетрубных котлов является помещение в них газовой коробки внутри корпуса котла. Помещенная в водяное пространство газовая коробка вызывала в корпусе котла и трубных решетках деформации, вредные напряжения и даже течи. Для устранения этих недостатков некоторые инженеры предложили удалить из корпуса котла газовую коробку. Для примера рассмотрим одну из таких конструкций, а именно котлы Солиани [1].

[1] См. также немецкий патент № 174700, 1904 г.

73. Котлы Солиани (Англия)

Для понижения веса шотландских котлов и уменьшения напряжений в стенках котла, связанных с наличием газовой коробки, Солиани предложил устраивать газовую камеру не в самом корпусе цилиндрического котла, а составлять ее из кипятильных труб (рис. 79а).

Наружные трубки газовой камеры своими нижними концами входили в водяной коллектор. Верхние же концы этих труб входили в трубную доску котла. Таким же образом Солиани строил и двойные котлы (рис. 79b).

Выгодными особенностями котлов Солиани являлись:

1) небольшой вес по сравнению с шотландскими котлами одинаковой паропроизводительности,

2) постановка в газовой камере внутреннего ряда кипятильных труб, что позволяло несколько защитить развальцовку задних концов дымогарных трубок от действия высоких температур газов.

Котлы Солиани в сравнении с водотрубными котлами имели и свои недостатки:

1) трудность очистки и развальцовки кипятильных труб,

2) невозможность повысить давление в котле выше 15 *ати*.

ПРОЛЕТНЫЕ КОТЛЫ

Все вышерассмотренные огнетрубные котлы получили весьма широкое распространение в коммерческом флоте, в котором они считаются основным типом котлов вплоть до наших дней во многих странах.

Котлы эти ставились, главным образом, на больших судах, так как они удовлетворяли основному требованию их: получению высокой производительности. Последняя естественно влекла за собой увеличение габаритных размеров и веса котлов, с чем в то время на больших судах мирились, так как помещения котельных и водоизмещение судов во многих случаях допускали установку даже относительно тяжелых и громоздких оборотных огнетрубных котлов.

Совершенно другие условия были на пароходах с малой осадкой и на быстроходных военных судах. Весьма ограниченные размеры котельных не позволяли вместить оборотные цилиндрические котлы больших диаметров (до 4—5 *м*).

Для данных судов котлостроительные заводы строили по аналогии с некоторыми котлами первой половины XIX в. так называемые пролетные и локомотивные котлы. Отличительной особенностью последних является размещение поверхностей нагрева за топками, а не над ними, как у выше рассмотренных оборотных огнетрубных котлов. В пролетном котле представлялось возможным при диаметре в 2,8 *м* разместить около 170 $м^2$ поверхности нагрева, тогда как для размещения такой же поверхности нагрева в ординарном оборотном котле его диаметр приходилось увеличивать до 4 *м*.

Рассмотрим конструкции, эксплоатационные и опытные характеристики данных котлов.

74. Котел авизо «Zieten», 1876 г. (Германия)

На рис. 80 показан пролетный котел авизо «Zieten», постройки 1876 г. Подробные характеристики котла приведены в табл. 18, п. 10

Высокое паронапряжение ($\frac{D}{H_к} = 33$ *кг/м²ч*) котла и небольшие габаритные размеры ($\frac{V_к}{D} = 5{,}4$ *м³/т*) выгодно их отличают от предыдущих котлов.

К числу недостатков котлов пролетного типа следует отнести их большую длину и требование иметь доступ сзади котла для осмотра его, постановки пробок и замены дымогарных трубок. Эти котлы приносят много забот эксплоатационному персоналу по устранению течи в передних трубных решетках. Последняя вызывается, главным образом, периодическим охлаждением топки холодным воздухом, врывающимся в топочное пространство во время загрузки топлива.

На появление течи в передней трубной доске влияет также неравномерность распределения газов в дымогарных трубках. В верхние трубы устремляется основная масса газов. Работа этих трубок находится в тяжелых температурных условиях.

Стремление уменьшить вредное влияние периодического охлаждения трубной доски и неравномерного распределения газов в дымогарных трубках побудило некоторые заводы в 70-е гг. XIX в. проверить в эксплоатации установку в газовой коробке отражательных сводов, как это и сделано в рассматриваемом котле. Эксплоатационные наблюдения над работой пролетных котлов со сводами показали, однако, что эти своды не оправдывали своего назначения. Наоборот, не принося большой пользы, они доставляли эксплоатационному персоналу много забот об их ремонте.

75. Котлы крейсера «Surprise», 1885 г. (Англия)

В более поздних конструкциях пролетных котлов, например в котле крейсера «Surprise», 1885 г. (рис. 81), отражательных сводов уже не ставили.

Отметим, что в последнем котле около 80% дымогарных трубок сделано из морской латуни, т. е. сплава, состоящего из 68% отборной красной меди и 32% цинка. Применение латунных трубок в котлах пониженного (до 10 *ати*) давления давало им большую надежность в работе в сравнении с котлами, у которых дымогарные трубки железные. Продолжительность службы латунных дымогарных трубок при давлении пара до 10 *ати* составляла в среднем 10—12 лет. Железные же трубки, подвергаясь коррозии, редко служили более 4 лет, а иногда только несколько месяцев. Кроме того, латунные трубки имеют почти в два раза большую теплопроводность по сравнению с железными. Во многих флотах они получили очень широкое распространение вплоть до 70—80-х гг. XIX в.

В некоторых же военных флотах, как, например, в германском, в 60—70-х гг. применялись исключительно латунные трубки, несмотря на то, что они в четыре раза дороже, чем железные.

Выгодным в данном случае являлось то, что и в забракованном состоянии латунные трубки сохраняли половину своей первоначальной стоимости.

Опыты, проведенные в 1890 г. главным инженером английского адмиралтейства Дерстоном[1] (Durston), показали, что латунные трубки давали течь при температуре трубной решетки в 325° Ц. Железные трубки при тех же условиях не дали никаких признаков течи. Это

[1] TINA. Стр. 130—156. Durston, A. J., 1893.

явление объясняется тем, что латунные трубки дают быстрое падение прочности при нагревании их стенок выше 200° Ц. В котлах повышенного давления (более 10 *ати*), а также там, где применялась сильная искусственная тяга, латунные трубки вытеснялись железными и стальными.

Свойственная эпохе империализма тенденция к увеличению мощности отдельных агрегатов отразилась и на развитии пролетных огнетрубных котлов. Вместо одно- и двухтопочных пролетных котлов, строившихся до начала 80-х гг., уже в 90-е гг. XIX в. начали строить трехтопочные котлы с часовой паропроизводительностью более 5 *т*.

76. Котлы крейсера IV кл. «Falke» постройки 1892 г. (Германия)

На рис. 82 показан один из таких трехтопочных котлов — котел крейсера «Falke». Поверхность нагрева его равна 170 *м*², тогда как в ранее рассмотренном двухтопочном котле она составляла всего 119 *м*².

Как показывает табл. 18, п. 13, эксплоатационные характеристики у данного котла почти такие же, как и у ранее рассмотренного котла авизо «Zieten» (табл. 18, п. 10), только давление пара в соответствии с требованием того времени было уже равным 12 *ати*. Поэтому цымогарные трубки в котле поставлены железные.

Из железных же листов сделаны также передние и задние стенки корпуса, топки Адамсона и газовая коробка. Болтовые же связи и цилиндрическая часть корпуса котла были сделаны из стали. Как видно из рис. 82, отражательный свод в котле отсутствовал.

Заслуживает внимания оригинальный способ крепления верхней части газовой коробки с корпусом котла посредством железных полос. При таком способе крепления имеется меньшая вероятность появления течи в верхних связях газовой коробки, так как напряжения, вызываемые в них, будут передаваться не в отдельных точках потолка газовой коробки, а распределятся сравнительно равномерно через угольники.

Но эта система крепления стесняла паровое пространство над газовой коробкой и затрудняла проход через нее.

Показанный на рис. 82 лаз в газовой коробке предназначался для удаления из нее золы. Это давало возможность легко производить удаление золы даже во время работы котла.

Однако, это преимущество вызвало и новый недостаток, а именно потребовалась довольно большая дополнительная площадь сбоку котла для производства выгреба золы из коробки.

Следует указать на весьма важный недостаток как пролетных, так и шотландских котлов, а именно на ограниченный объем их топок и газовых коробок в сравнении например с коробчатыми котлами. У последних объем топочного пространства был примерно на 33% выше. Стесненность объема топочного пространства у пролетных шотландских котлов вызывала при прочих равных условиях понижение к. п. д. котла примерно на 4—6%.

В цилиндрических огнетрубных котлах для размещения необходимой площади колосниковой решетки приходилось удлинять топки в среднем до 2 *м* против 1,75 *м* у коробчатых котлов. Это затрудняло обслуживание решетки. На практике часто задняя часть решетки покрывалась слоем топлива неодинаковой толщины, а иногда оставалась обнаженной, давая свободный проход в топку холодному воздуху.

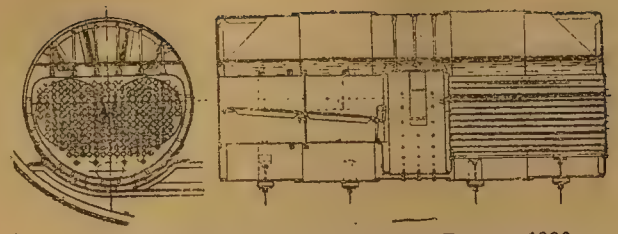


Рис. 80. Пролетный котел Aviso „Zieten" 1886 г.

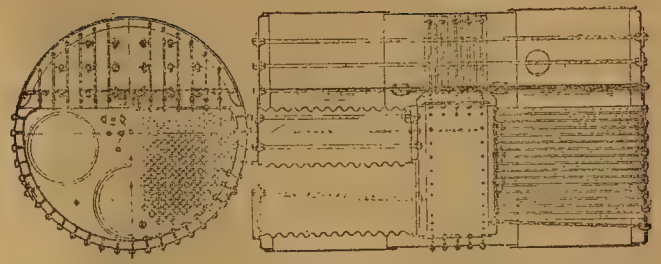


Рис. 81. 3-топочный пролетный котел крейсера „Surprise" 1885 г.

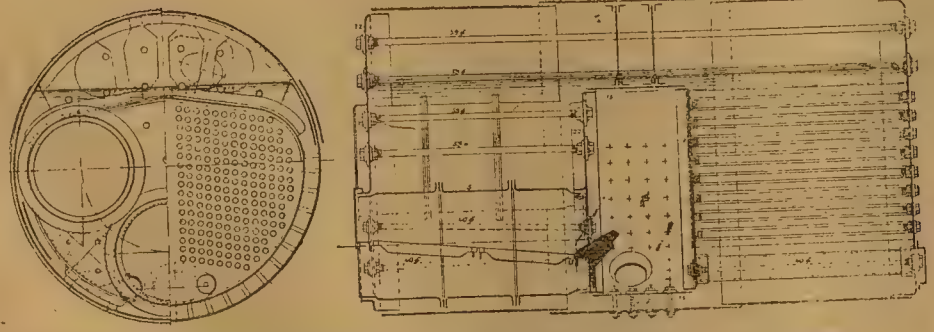


Рис. 82. 3-топочный пролетный котел крейсера IV класса „Falke" 1892 г.

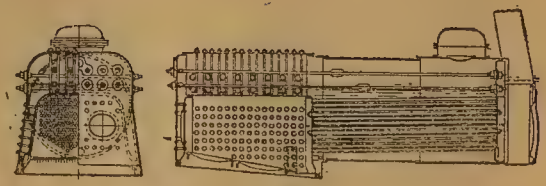


Рис. 83. Локомотивный котел миноноски класса „Schütze".

В этом отношении значительно большую выгоду представляли локомотивные котлы, введенные в судовые установки еще в первой половине XIX в. У них габаритные размеры топки при прочих равных условиях больше, чем в цилиндрических огнетрубных котлах. Но самое важное то, что эксплоатационные характеристики, как-то: $\frac{D}{H_к}$, $\frac{B}{R}$ и др., у локомотивных котлов удалось довести до рекордных для того времени размеров. С этой точки зрения они представляли наилучший тип котла в сравнении с другими огнетрубными котлами.

Во второй половине XIX в. локомотивные котлы лучше, чем все другие типы котлов, удовлетворяли основным требованиям миноносных судов, легких канонерских и быстроходных минных судов. Они могли на 1 *т* своего веса с водой обеспечить мощность машин раза в 2—3 больше, чем остальные типы огнетрубных котлов. Объем, занимаемый локомотивным котлом, отнесенный к 1 *т* производимого им пара, был также примерно в два раза меньше, чем у оборотных котлов.

Рассмотрим конструктивные особенности локомотивных котлов и те причины, которые позволили им занять первое место в соревновании на достижение наивысшего паронапряжения [1].

77. Локомотивные котлы миноноски класса «Schütze» 1882 г. (Германия)

На рис. 83 показан локомотивный котел миноноски класса «Schütze», построенный в 1882 г. От пролетных этот котел отличается лишь коробчатой формой топки и отсутствием газовой коробки.

Боковые стенки топки выполнялись всегда плоскими и имели небольшой уклон в середине для более легкого отделения пузырьков пара от плоских топочных стенок.

Котлы допускали давление пара до 13 *ати*, несмотря на наличие плоских стенок топки.

Плоская часть топки укреплялась связями, менее загромождающими доступ к осмотру и очистке внутренних частей.

Трубки котла выполнены из латуни, и только 6 связных трубок, предназначенных для укрепления передней и задней трубных решеток от раздувания, сделаны из железа.

Стенки топочной камеры выполнены из красной меди. Как уже упоминалось выше, ранее котлы делались почти исключительно из красной меди. Применение последней в котлостроении было вызвано ее хорошими качествами, а именно однородностью получаемого из нее металла, слабой подверженностью его коррозии от действия морской воды и окисляющих продуктов горения. Помимо этого, теплопроводность меди равна 300—340 *кал/мч* °Ц против 40—50 *кал/мч* °Ц у железа. Из красной меди строили топки почти на всех паровозных котлах, даже в начале XX в.

Широкое применение меди для локомотивных котлов в судовых условиях продолжалось лишь до 90-х гг. XIX в., пока не научились

[1] Marshall Fr. Progress and development of the marine engine. TINA. Стр. 26—56, 1888.
Busley C. Die Schiffsmaschine. Kiel u. Leipzig, 1901.

производить высококачественную котельную сталь, которая с успехом могла заменять медь. Последняя слишком высоко стоила. Кроме того временное сопротивление меди на разрыв было равно лишь 25 *кг/мм*², тогда как у стали оно доходило тогда до 40—50 *кг/мм*². Медь могла давать трещины между связными и дымогарными трубками от периодических растяжений и сжатий.

Удлинение трубок от попеременных температурных напряжений способствовало этому появлению трещин.

Удлинение трехметровой латунной трубки при изменениях ее температуры от 100 до 200° Ц составляло 6 *мм*, тогда как железная связная трубка такой же длины при этих условиях удлиняется лишь на 3,9 *мм*. Трубные же решетки из красной меди при развальцовке дымогарных трубок раздаются значительно больше, чем, например, железные.

Продолжительность службы топочной рамы из красной меди редко превышала 3—4 года, после которых приходилось производить ее замену, останавливая котел на капитальный ремонт.

В 90-е гг. XIX в. почти все части локомотивных котлов начали делать из стали.

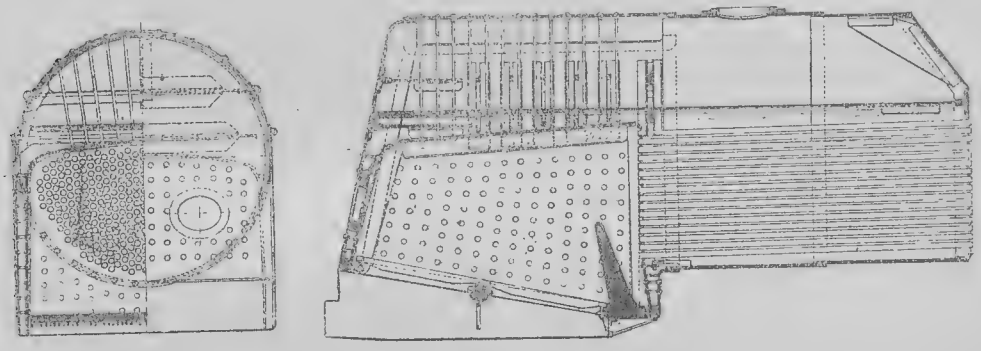


Рис. 84. Котел для китайской миноноски постройки 1892 г., выполненный из стали.

78. Локомотивный котел китайского миноносца (Англия)

На рис. 84 показан один из стальных котлов постройки 1892 г., находившийся в эксплоатации на китайской миноноске.

Топка котла имела две топочные дверцы небольшого размера, благодаря чему уменьшалось засасывание холодного воздуха при забрасывании топлива. Однако, небольшие дверцы были невыгодны в том отношении, что затрудняли обслуживание решетки.

Как показывает табл. 18, пп. 34, 36, 37, среднее паровое напряжение этого типа котлов составляло 37—48 *кг/м²ч* против 25—40 *кг/м²ч* у ранее рассмотренного типа локомотивных котлов.

Сталь, имея большую прочность в сравнении с латунью и красной медью, допускала и большую форсировку.

По опытам Маршалла[1], в локомотивных котлах при напоре воздушного дутья в 126 *мм* вод. ст. паронапряжение поверхности нагрева доходило до 92 *кг/м²ч*. Весовое напряжение решетки составляло 590 *кг/м²ч*. Правда, эта максимальная нагрузка продолжалась всего 1 ч. 15 м. При напоре дутья в закрытую котельную в 100—125 *мм*

[1] TINA. Стр 212, 1886.

вод. ст. удавалось доводить $\frac{B}{R}$ до 500 *кг/м²ч* и $\frac{D}{H_к}$ до 80 *кг/м²ч* и в судовых условиях.

После нескольких часов такой форсировки работы котла дымогарные трубки, как правило, зашлаковывались, и паропроизводительность котла быстро падала. Единственным выходом из этого положения являлась остановка котла на чистку труб от шлака.

Достижение больших напряжений поверхностей нагрева не проходило бесследно и для прочности котла.

Как и у пролетных котлов, стенки топки, трубная решетка и дымогарные трубки периодически охлаждались холодным воздухом во время открытия топочных дверец. При усиленной форсировке работы котла в топочной раме и особенно в трубной решетке наблюдалось резкое колебание температурных напряжений, приводящее к появлению течи в трубных решетках и в заклепочных швах. По данным опытов, при максимальной нагрузке уровень воды в простенках топочной камеры (рис. 85) мог быть значительно ниже среднего уровня воды в котле. Свободные от воды простенки заполнялись так называемым паровым мешком [1]. В результате отвод тепла от внутренних стенок был сильно понижен. Теплопередача от стенки к пару при данных условиях, по Мюнцингеру, будет составлять около 100 *кал/м²ч* °Ц. В то же время теплопередача от стенки к воде, по «Hütte», будет равна примерно 4000 *кал/м²ч* °Ц, т. е. в 40 раз больше, чем от стенки к пару.

Образование больших паровых мешков часто являлось главной причиной появления течи в стенках топки и даже пережога стенок.

Для борьбы с этим недостатком практика выработала следующие мероприятия: ведение умеренной форсировки котла или обеспечение более интенсивного смывания паровых пузырьков с топочных поверхностей. Так как первое мероприятие не всегда приемлемо в судовых условиях, в особенности на военных кораблях, стремление сохранить достигнутое паронапряжение заставило котлостроительные заводы работать над вопросом улучшения циркуляции воды в простенках камеры.

79. Мокродонные локомотивные котлы 1886—1887 гг. (Англия)

В результате длительной экспериментальной работы заводы начали строить мокродонные (Nassboden) котлы, 1886 г. (рис. 85а), иногда с циркуляционными трубами по средине топки, чем значительно увеличивалась радиационная поверхность нагрева топки, а стало быть, и паропроизводительность всего котла.

Паронапряжение поверхности топки в несколько раз превышало паронапряжение конвекционной поверхности нагрева котла.

При таком же устройстве циркуляционных труб предполагалось, что по средине трубы будет итти интенсивное опускание воды из-за небольшого сопротивления со стороны поднимающихся здесь пузырьков пара. Считалось, что основная масса пузырьков будет подыматься не по средине трубы, а по краям. Стенки трубы для легкости отделения паровых пузырьков от них были сделаны расширяющимися.

Эксплоатационные наблюдения над работой этой топки показали, что она дает значительное увеличение паропроизводительности котла

[1] Charles Bellen. Traité des chaudières à vapeur. Стр. 222, Paris, 1895.

и циркуляции воды в нем в сравнении с другими локомотивными котлами одинаковой поверхности нагрева.

Конструктивное изменение топки принесло и новые недостатки: во-первых, увеличение веса котла, во-вторых, трудность производства осмотра и ремонта днища топки, в-третьих, течи в швах, соединяющих циркуляционные трубы с потолком топки; последнее происходило из-за периодических колебаний температур. Впоследствии начали отказываться от применения циркуляционных труб в мокродонных котлах (рис. 85b).

К мероприятиям, направленным к конструктивному улучшению данного котла, следует отнести постановку в конце трубной решетки порога из огнеупорного кирпича, который должен был предохранять

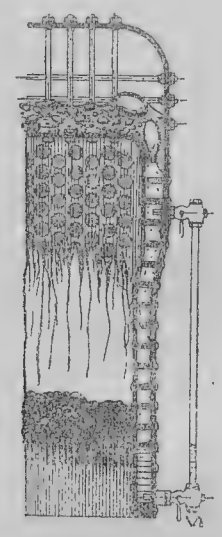


Рис. 85. Разность уровней воды в локомотивном котле.

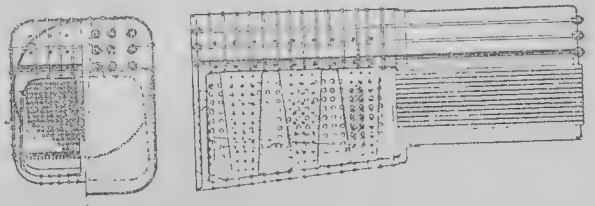


Рис. 85a. Мокродонный локомотивный котел с циркуляционными трубами.

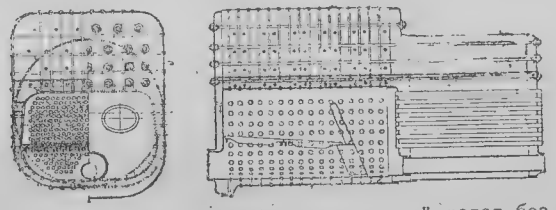


Рис. 85b. Мокродонный локомотивный котел без циркуляционных труб.

трубную решетку от непосредственного действия холодного воздуха на нее во время загрузки топлива. Как показала практика, с этой задачей пороги справлялись неплохо, но зато их приходилось часто ремонтировать.

При зашлаковывании передней трубной решетки останавливали котел и ждали, пока он остынет, чтобы обслуживающий персонал мог удалить с трубных решеток шлак.

В начале XX в. повсеместное увеличение паропроизводительности судовых котлов коснулось и локомотивных котлов. Для увеличения паропроизводительности котла увеличивали их поверхность нагрева, площадь колосниковой решетки и объем топочного пространства.

Однако, при эксплоатации больших локомотивных котлов было выявлено, что в одной топке нельзя допускать увеличения площади решетки выше 4 $м^2$, так как при чистках таких больших решеток паропроизводительность котла резко падала. На пороге XX в. там, где в локомобильном котле требовалась решетка более 4 $м^2$, устраивалось две топки.

Несмотря на большую работу, проделанную котлостроительными заводами и эксплоатационным судовым персоналом по усовершен-

ствованию пролетных и локомотивных котлов, они все же оставались мало надежными в эксплоатации.

Их постепенно начали вытеснять из военных судов новые водотрубные котлы, которые давали лучшие эксплоатационные характеристики.

Наметившийся к концу XIX в. решительный переход от огнетрубных к водотрубным котлам создал большую тревогу в лагере владельцев сталелитейных и котлостроительных заводов.

БОРЬБА ЗА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОГНЕТРУБНЫХ КОТЛОВ

Сталезаводчики боялись потерять заказы на дорого стоящий материал — котельную сталь, от которой они получали колоссальные прибыли, но больше всего боялись потерять свои прибыли владельцы котлостроительных заводов.

О размерах этих сверхприбылей говорят следующие данные. Завод Leeds Forge производил только одних топок Мориссона 15 шт. в день,

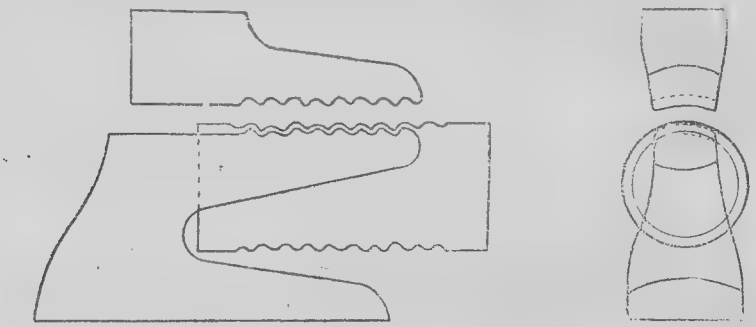


Рис. 86. Молот для обработки топок Фокса.

причем себестоимость каждой топки для завода составляла от 6,51 до 8 фунтов стерлингов, завод же продавал эти топки в среднем за 61 фунт стерлингов каждую, т. е. в девять раз дороже себестоимости.

Желая увеличить или по крайней мере сохранить свои прибыли, заводчики с каждым годом повышали требования к рабочим на тщательность производимых ими работ. Для этого же они вводили усовершенствования в технологический процесс производства топок.

Так, например, для производства топок Фокса, начавшегося в 1879 г., применялся обыкновенный паровой молот с наковальней волнообразной формы (рис. 86).

Процесс производства топок Фокса паровым молотом в это время в общих чертах был следующий. Котельный лист свертывался в цилиндр при помощи обыкновенных горизонтальных валиков. Цилиндр сваривали (автогеном) и помещали в специальную нагревательную печь. Вынутую из печи топку надевали на наковальню и ударами бойка проходили по окружности, повертывая топку после каждого удара. Волны и диаметр топки при таком технологическом процессе получались неодинаковыми.

В 1882 г. Фоксом были изобретены специальные валки. Применением этих валков удалось значительно улучшить и ускорить производство топок Фокса. Технологический процесс при применении валков протекал со следующими изменениями. Прокатанный, как и раньше, котельный лист посредством паровых ножниц обрезался

по шаблону и потом на горизонтальных валках свертывался в цилиндр. Затем цилиндр сваривался посредством светильного газа внахлестку на сварочном станке. Конец шва нагревался специальными горелками сверху и снизу. Топку подкатывали к наковальне и частыми ударами молота сваривали в один прием шов длиной в 300 *мм*. Затем сварку продолжали до средины топки. Закончив сварку одной половины топки, ее повертывали и продолжали сваривать другой конец топки. По окончании сварки топку нагревали в особой печи докрасна и помещали в гофрировальные валки. Нажатием нижнего вращающегося гофрировального валка производилось гофрирование топки.

Примерно также протекал процесс гофрирования и топок Пёрвеса и Мориссона.

Одновременно с усовершенствованием процесса производства топок вводятся улучшения и в сборке котла. Вместо ранее применяемого продавливания дыр для заклепочных швов в конце XIX в. уже сверлят дыры на месте специальными станками (рис. 87 и 87а). Это давало более плотные швы.

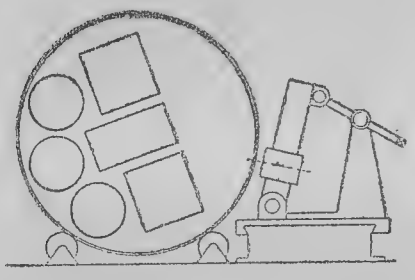


Рис. 87. Станок для сверления дыр в корпусе котла.

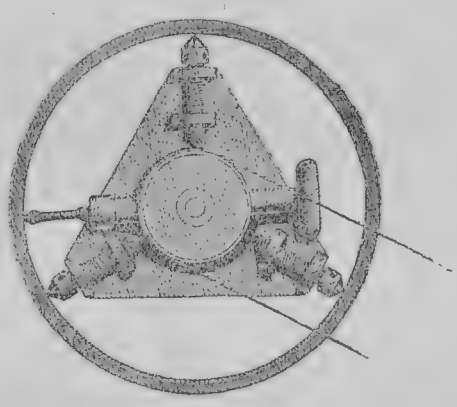


Рис. 87а. Станок для сверления дыр в топке.

В 90-е гг. XIX в. были получены большие достижения и в производстве высококачественных сталей для котлостроения. Для изготовления огнетрубных котлов было освоено производство никелевой стали (содержание около 3% никеля), которая имела временное сопротивление на растяжение более 55 *кг/мм*² (при удлинении в 25%) против примерно 45 *кг/мм*² у мягкой котельной стали (при удлинении у нее, равном 22%).

Построенный из никелевой стали пробный котел для американского крейсера «Chicago» при испытаниях дал лучшие результаты, чем требовалось по контракту.

ВЫВОДЫ

Развитие промышленности и торговли и подготовка к империалистическим войнам в 60—90-е гг. XIX в. выдвинули ряд новых требований к постройке и эксплоатации судовых паровых котлов, а именно:

1) уменьшение веса и габаритных размеров паросиловых установок,

2) увеличение к. п. д. котельной установки,

3) повышение мощности котельной установки,

4) повышение надежности работы котельной установки.

I. Уменьшение веса и габаритных размеров паросиловой установки вызывалось требованием увеличения быстроходности судов и радиуса их плавания.

1. Для уменьшения веса и габаритных размеров судовых механизмов стремились повысить давление пара в машинах и применять перегретый пар.

2. Повышение давления пара в котле вплоть до 70-х гг. XIX в. в основном тормозилось неосвоенностью работы холодильников.

3. Более легко удалось достигнуть повышения мощности и к. п. д. установки (стало быть, уменьшения веса и габаритных размеров) путем применения перегретого пара. Отсутствие огнестойких смазочных материалов не позволило в то время применять перегретый пар выше 170—180° Ц. Попытки перейти этот предел часто заканчивались разрушением механизмов. Когда в 80-е гг. стали использовать пар давлением 7—9 *ати* (температура насыщения 170—180° Ц), тогда от перегрева его начали отказываться.

4. Опытные и эксплоатационные наблюдения над работой судовых механизмов показали, что с повышением давления и температуры перегретого пара представляется возможным значительно уменьшить вес и габаритные размеры механизмов и одновременно увеличить их мощности и к. п. д. установки. Поэтому велась большая исследовательская работа по устранению препятствий к дальнейшему повышению давления и перегрева пара.

II. Увеличение к. п. д. установки достигалось:

1) удлинением газоходов и увеличением отношения $\frac{H}{R}$;

2) постановкой в дымоходы пароперегревателя;

3) применением горячего дутья;

4) устройством в конце газоходов водяных экономайзеров.

Из всех перечисленных способов повышения к. п. д. установки наиболее эффективными оказались применение горячего дутья и перегрева пара.

III. Повышение мощности установки осуществлялось:

1) увеличением поверхностей нагрева котлов и площади колосниковой решетки;

2) применением холодного и горячего дутья;

3) повышением давления и температуры пара;

4) повышением интенсивности работы обслуживающего персонала.

IV. Повышение надежности работы котельной установки достигалось:

1) увеличением требований к питательной воде;

2) заменой инжекционных холодильников поверхностными;

3) установкой испарителей;

4) повышением требований к котлостроительным материалам. При постройке котлов железо заменяли мягкой сталью; применяли даже никелевую сталь. Плоские цилиндрические топки сменялись волнообразными топками Фокса, Мориссона, Пёрвеса;

5) производством весьма тщательных исследований напряжения в отдельных элементах котла (газовая коробка, корпус котла, передние и задние днища, топки, дымогарные трубки и т. д.).

V. В конце XIX в. в коммерческом флоте основным типом котлов считались ординарные и двойные шотландские котлы.

Живучесть огнетрубных шотландских котлов и их сопротивляемость вытеснению другими системами объясняется теми большими преимуществами, которые они имели. Главные из них:

1. Возможность поддержания почти постоянного давления пара в котле даже при резких изменениях его паропроизводительности.

2. Получение более сухого пара, чем в других котлах.

3. Неприхотливость котлов к качеству питательной воды. В случае крайней необходимости огнетрубные котлы, понизив свое рабочее давление до 3,5 *ата*, могли питаться даже забортной соленой водой.

4. Простота ухода за котлами.

5. Несложный и недорогой ремонт, а, главное, возможность закупоривания пробками поврежденных трубок даже во время работы котла.

Несмотря на все перечисленные преимущества огнетрубных котлов, последние уже к концу XIX в. начали тормозить развитие котельной техники, особенно в области повышения давления пара.

В связи с новыми требованиями увеличения быстроходности и радиуса плавания, главным образом, в военном флоте, к паровым котлам предъявлялись повышенные требования в области увеличения паронапряжения и уменьшения веса и габаритных размеров котла, а также сокращения времени растопки и др. Попытки дальнейшего усовершенствования огнетрубных котлов не давали сколько-нибудь эффективных результатов в выполнении этих требований из-за их недостатков. Главные из них:

1. Крайне слабая циркуляция воды в огнетрубных котлах ограничивала часовой съем пара с 1 $м^2$ поверхности нагрева в среднем до 30—40 *кг*.

2. Наличие плоских стенок в котлах требовало специальных креплений их болтовыми связями, которые обычно и загромождали внутреннее пространство его и тем самым затрудняли осмотр и очистку внутренних поверхностей нагрева котла и уменьшали эластичность их.

3. Невозможность применения огнетрубных котлов для высокого давления и высоких паропроизводительностей из-за их прогрессивного утяжеления с повышением давления. Так, например, каждый котел, установленный на германском транспортном судне «Pelican», имел диаметр 4 *м*, длину 5,9 *м*, толщину стенок наружного корпуса 30 *мм* и вес 57,8 *т*, между тем поверхность нагрева одного котла составляла 390 $м^2$.

4. Жесткость конструкции огнетрубных котлов, обусловленная неравномерностью температур отдельных его элементов и наличием большого числа болтовых связей.

5. Редкие крупные аварии котла имели очень сильное разрушающее действие, приводящее иногда к гибели судна.

6. Стесненность в развитии площади колосниковой решетки и топочного пространства.

7. Большая продолжительность растопки. Так, например, нормальная продолжительность растопки огнетрубных котлов с холодного состояния равнялась 12 часам, и только в случае самой крайней необходимости растопка могла быть произведена в течение 3 часов.

Все перечисленные здесь недостатки огнетрубных котлов выявлялись постепенно в процессе эксплоатации и развития котельной техники. Стремление уменьшить эти недостатки побудило некоторые котлостроительные заводы заняться разработкой и освоением постройки так называемых водотрубных котлов. «Детские болезни», неизбежные для начального периода эксплоатации судовых водотрубных котлов в 1830—1860 гг., не остановили изыскательной работы котлостроительных заводов. Последние настойчиво добивались разработки надежно работающих и отвечающих новым требованиям водотрубных котлов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К III ГЛАВЕ

1. Beck L. Geschichte des Eisens. B. V. Braunschweig, 1903.
2. Bellen Ch. Traité des chaudières à vapeur. Paris, 1895.
3. Bienaymé A. Les machines marines. Texte et atlas. Paris, 1887.
4. Bourne J. A catechism of the steam engine in its various applications to mines, mills, steam navigation, railways and agriculture. London, 1865.
5. Busley C. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktion, Wirkungsweise und Bedienung. Bd. I, II (Atlas). Kiel, 1886.
6. Busley C. Die Schiffsmaschine, ihre Bauart, Wirkungsweise und Bedienung. Bd. I (Atlas). Kiel und Leipzig, 1901.
7. Busley C. Die Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten. Berlin, 1892.
8. Bauer Dr., G. Berechnung und Konstruktion der Schiffsmaschinen und Kessel. Ein Handbuch zum Gebrauch für Konstrukteure, Seemaschinisten und Studierende. München, und Berlin, 1902.
9. Bertin and Robertson. Marine boilers, their construction and working, dealing more especially with tubuluos boilers. London, 1898.
10. Bieg F. C. Naval boilers text-book for the instruction of midshipmen. Annapolis. The United States Naval Institute, 1906.
11. Burgh N. B. A practical treatise on the condensation of steam. London, 1871.
12. Bach C. Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen. H. 5. Berlin, 1900.
13. Campin F. A practical treatise on mechanical engineering comprising: Metallurgy, moulding, casting, farging, tools, workshop, machinery, mechanical manipulation of the steam engine. 28 p. Boilers, steam engines, workshop machinery etc. London, 1863.
14. Clergeau M. Guide pratique du chauffeur et du mécanicien sur les bateaux-torpilleurs. 9 édit. Paris, 1895.
15. Demoulin M. Les machines à vapeur à triple et quadruple expansion et les progrès récents des appareils de navigation. Paris, 1890.
16. Demoulin M. Nouvelles machines marines des bâtiments à grande vitesse, des torpilleurs, des embarcations à vapeur. Texte et atlas. Paris, 1888.
17. Donkin Bryan. The heat efficiency of steam boilers land, marine and locomotive with tests and experiments on different types. London, 1898.
18. Dietrich Max. Der moderne Dampfkessel der Kriegs—und Handelsschiffe. Seine Konstruktion, Wirkungsweise, Behandlung und Bedienung. Ein Handbuch für Schiffoffiziere, Konstrukteure und Studierende. Rostock, 1908.
19. Evers H. Steam and the steam engine, land, marine and locomotive. 3 edit. London and Glasgow, 1878.
20. Edwards E. Modern american marine engines, boilers and screw propellers. Philadelphia, 1881.
21. Fairbairn W. Useful information for engineers. 3 edit., London, 1860.
22. Fassel J. Anleitung zum Betriebe und zur Instandhaltung der Schiffsdampfkessel und Schiffsdampfmaschinen. Laibach, 1878.
23. Feldhaus Franz M. Leonardo der Techniker und Erfinder. 1922.
24. Girard I. B. Traité pratique des chaudières marines; description, entretien, conduite à l'usage des mécaniciens de la marine militaire, de la marine du commerce et de l'industrie. Paris, 1897.
25. Hahn und Wegener. Die Schiffs-Dampfmaschine. Bearbeitet für Seeschiffer und Seesteuerleute. 2. Aufl., Bremen, 1891.
26. Haldane J. W. C. Steamships and their machinery from first to last. London, 1893.
27. Hartig Julius. Aus der Praxis für die Praxis Ein Handbuch für Schiffsingenieure. Text und Atlas. 6. Aufl. Bremerhaven, 1908.
28. Hoadley. Warmblast steam boiler furnace. New-York, 1886.
29. Hutton W. Steam boiler construction. A practical handbook for engineers, boiler-makers & steam — users, containing a large collection of rules and data relating to recent practice in the design, construction and working of all kinds of stationary, locomotive & marine steam boilers. London, 1898.
30. Jamieson A. Text on steam and steam engines. London, 1886.
31. Knorr E. Handbuch der Schiffsdampfmaschinenkunde. Berlin, 1867.
32. Ledieu A. Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation. Avec atlas. V. II. Paris, 1864.
33. Leitfaden für Maschinistenapplikanten der Kaiserlichen Marine. Neubearbeitung der Ausgabe. 1890, I v. Berlin, 1895.
34. Mathias E. Handbuch für den Schiffsmaschinen-Dienst. B. I, 1870.
35. Müller. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktionsprinzipien. Anordnung und Bedie

nung. Ein Handbuch für Schiffsingenieure und Offiziere der Handelsmarine. Braunschweig, 1908.
36. Montchoisy B — on de. Cours pratique et théorique des machines à vapeur professé à l'école supérieure de maistrance de la marine. Paris, 1892.
37. Martinenq B. Aide — mémoire du constructeur des navires, des machines et chaudières marines, du mécanicien, du navigateur, de l'armateur. Instructions et renseignements théoriques et pratiques à l'usage de la marine de guerre, de commerce et de plaisance. Paris, 1891.
38. Ortolan A. Code de l'acheteur, du vendeur et du conducteur des machines à vapeur. Paris, 1861.
39. Parsons H. de B. Steam boilers, their theory and design. London and Bombay, 1903.
40. Rankine. A manual of the steam engine. 1873.
41. Saxby S. M. The study of steam and the marine engine. London, 1862.
42. Séaton A. E. A manual of marine engineering. London, 1885.
43. Schwarz-Fleming. Die Kesselabteilung auf Dampfschiff. Berlin, 1873.
44. Sennet R. The marine steam engine; a treatise for the use of engineering students and officers of the Royal Navy. London, 1882 a. 1885.
45. Sirk V. H. Der Betrieb von Schiffsdampfkesseln und Maschinen. Wien, 1875.
46. Temple L. du. Cours des machines à vapeur. Appareils employés pour la navigation. 2 édit. Paris, 1865.
47. Thomson D. Engineer's guide to the naval and local machine bards. 2 edit. London, 1866.
48. Tomkins A. E. A text-book of marine engineering. 2 edit. Portsmouth, 1904.
49. Watson E. P. The modern practice of american machinists and engineers. Philadelphia, 1867.
50. Traill Thomas W. Boilers, their construction and strength. A handbook of rules, formulas, tables etc, relative to material scantlings and pressures, safety valves, springs, fittings and montings etc for the use of engine surveyors, draughtsmen, boilermakers and steam users. London, 1888.
51. Wilda H. Schiffsmaschinenkunde mit besonderer Berücksichtigung der Hilfsmaschinen. Leitfaden für Seedampfschiffsmaschinisten zur Vorbereitung auf die Prüfung für den Schulgebrauch und für die Praxis. 3 Aufl. Hamburg, 1903.
52. Winton J. G. Modern worksshop practice as applied to marine, land and locomotive engines, floating dock, dredring mashines bridges, shipbuilding, cranes etc. London, 1869.

Английские патенты

1867 г., № 2389, № 575, № 2920, № 988, № 2777; 1866 г. № 2239; 1869 г. № 818; 1870 г. № 549, № 3137.

Журнальные статьи к III главе

1. Engineering. Стр. 72. Goods-locomotive with boiler for burning waste anthracite coal. 1879.
2. Engineering. Стр. 447. Kemp E., Govan, Renfrew N. B. Improvements in compound boilers or apparatus for heating water und generating steam. VII—XII 1887.
3. Engineering. Стр. 167. W. Parker. Improvement, progress and development of the marine engine. VII—XII 1887. См. также Trans. INA, vol. 28, Pp. 125—146, 1887.
4. Engineering. Стр. 90. Trial of the „Ohio". VII—XII 1887.
5. Engineering. Стр. 54—55. Kemp's high and low temperature marine boilers. I—VII 1887.
6. Engineering. Стр. 103. Arrangement of engines and boilers of the steam-yacht „Gladiator". I—VI 1887.
7. Engineering. Стр. 328. Leverich G. The cable railway on the New-York and Brooklyn. VII—XII 1888.
8. Marine Engineer. Стр. 176—178. Trial trips „Empress". 1888.
9. Engineer. Стр. 256. On the application of moderate forced draught to the furnaces of small steam vessels, upon Willans system. I—VI 1885.
10. TINA. Vol. 27, стр. 1—17. White. On the speed trials of recent war ships. 1886.
11. TINA. Vol. 28, стр. 317—334. A. Speyer. The machinery of small boats for ships of war. 1887.
12. TINA. Vol. 25, стр. 129—152. Howden J. On combustion of fuel in furnaces of steam boilers by natural draught and by supply of air under pressure. 1884.
13. TINA. Vol. 24, стр. 55—76. Butler, R. J. On the steam trials of the „Satellite" and „Conqueror" under forced draught. 1883.
14. TINA. Vol. 27, стр. 182—219. Howden J. On forced combustion in furnaces of steam boilers. 1886.

15. TINA, Vol. 29, стр. 284—303. Soper Thomas. Boilers under forced draught on the closed stokehold system. 1888.
16. TINA. Vol. 29, стр. 265—283. Fothergill J. T. Forced draught. 1888.
17. TINA. Vol. 26, стр. 204—225. Milton. Some notes on the strength of riveted joints. 1885.
18. TINA. Vol. 26, стр. 166—178. Robinson. On the application of moderate forced draught to the furnace of small steam vessels upon Willans system. 1885.
19. TINA. Vol. 34, стр. 130—156. Durston A. J. Some experiments on the transmission of heat through tube plates. 1893.
20. TINA. Vol. 34, стр. 157—166. Milton. Notes on some alterations of form to which boilers are subject when under working conditions. 1893.
21. TINA. Vol. 35, стр. 42—59. Ellis J. D. Some experiments on the combination of induced draught and hot air, applied to marine boilers fitted with „Serve" tubes and retarders. 1894.
22. TINA. Vol. 36, стр. 83—94, Gross. Recent experience with cylindrical boilers and the „Ellis and Eaves" section draught. 1895.
23. VDI. Стр. 911—913. Schiffbau. Das Spanische Torpedoboot „Ariete". 1887.
24. VDI. Стр. 917—920. Schiffbau. 1886.
25. VDI. Стр. 437—433, 461—466, 490—495, 511—518, 536—541, 582—587, 611—617, 630—633, 653—658, 677—681. Busley. Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten. 1888.
26. Морской сборник. № 1, стр. 103. О жировых кислотах в воде паровых котлов и мерах к их устранению. 1891.
27. The Engineer. Стр. 465, 1882; стр. 50, 1885; стр. 162 и 544, VII—XII 1886; стр. 497 и 521, 1887.
28. Engineering. Стр. 409, VII—XII 1881; стр. 60, VII—XII 1887; т. II, стр. 235, VII—XII 1889.
29. The marine engineer. Стр. 324, 405, 291—364, 1887.
30. VDI. Стр. 300, 1887.

Русская литература к III главе

1. Алексеев П. и Петров. Паровые котлы. Формулы и таблицы для определения прочности паровых котлов и их частей. СПБ, 1897.
2. Анцеулов А. и Сергеев Н. Кочегарное дело. Описание судовых котлов и их приборов и практические наставления для ухода за ними. СПБ, 1883.
3. Афанасьев В. Н. Практические формулы для судовых механизмов. Статьи из газеты „Котлин", СПБ. 1905.
4. Бауэр Г. Расчеты и конструкция судовых машин и котлов. СПБ, 1903.
5. Бненемэ А. Ф. Морские машины. Курс французского морского инженерного училища. Перев. И. Ососова. СПБ, 1892.
6. Борович Л. А. Котельное производство. Практическое руководство для техников, мастеров, котельных указателей, разметчиков, котельщиков, а также владельцев паровых котлов. СПБ, 1910.
7. Бурачек И. Уход за паровым котлом. СПБ, 1873.
8. Буслей К. Новейшие торговые и военные быстроходные паровые суда. Лекции проф. морской академии в Киле около 1890 г.
9. Буслей К. Судовые механизмы. Часть I. Котлы и вспомогательные механизмы. Перев. с немецкого инж.-мех. Г. Пио-Ульский и К. Бардт. СПБ, 1889.
10. Голов Д. Современные паровые котлы военных судов. СПБ, 1897.
11. Голов Д. Технические условия морского министерства на поставку машиностроительных материалов и изделий и правила приемных испытаний вновь построенных судовых механизмов. СПБ, 1907.
12. Голов Д. Усовершенствование судовых механизмов. Извлечение из сообщений на курсе военно-морских наук Николаевской морской академии. Морской сборник, № 5—6, 1898.
13. Голов Д. Повреждения на судах и их исправления судовыми средствами. Т. I. Повреждения судовых машин и котлов. СПБ, 1897.
14. Депп Г. Ф. Об опытах, произведенных с целью исследования действия питательной воды на раскаленную стенку жаровых труб. СПБ, 1891.
15. Депп Г. Ф. Паровые котлы. Лекции, читанные в технологическом Институте. СПБ, 1908.
16. Домашнев Д. М. Паровые котлы (часть описательная). Курс морского инженерного училища. СПБ, 1910.
17. Данилевский В. В. Очерки истории техники XIX в. М.—Л. 1934.
18. Жанвие. Правила и руководства для начальника, механика и для управляющего машиною на пароходе. Перев. с франц. Глазенап. СПБ. 1831.

19. Заблудовский Е. П. и Таненбаум А. Друг кочегара. Руководство к правильному уходу за паровыми котлами. СПБ, 1892.
20. Завалишин. Паровые котлы. СПБ, 1887.
21. Объяснительная записка к проекту правил надзора за пароходными котлами. СПБ.
22. Перковский П. Описание судовых машин и котлов. СПБ, 1896.
23. Погодин А. Паровые машины. Теоретический курс паровых машин морского инженерного училища. СПБ, 1900.
24. Петров А. Учебник для кочегаров. СПБ, 1898.
25. Прокофьев И. П. Руководство к изучению практического проектирования морских судовых машин и котлов военного и коммерческого флотов. Ч. I, СПБ, 1905.
26. Пио-Ульский Г. И. Курс проектирования котлов. 1907.
27. Рело. Конструктор. Руководство к проектированию машин. Москва, 1881.
28. Русанов К. Заметки по котельному делу в Англии. СПБ, 1894.
29. Рюль. Подогрев питательной воды отходящими газами. Перев. с немецкого. Г.Т.И., 1930 г.
30. Сеннет Р. Морские паровые машины. Перев. с. англ. В. Куприянов. СПБ, 1886.
31. Сеннет Р. и Оралс Г. Ж. Морская паровая машина. Перев. с англ. инж.-мех. И. Вишневский. СПБ, 1902.
32. Ситон А. Е. Руководство по проектированию морских машин и котлов. Перев. с англ. Талят-Келиш. СПБ, 1894.
33. Спесификация паровых механизмов для броненосного крейсера „Рюрик" за № 13250, 1892.
34. Спесификация паровых механизмов для броненосного корабля „Сисой Великий". СПБ, 1892.
35. Сборник рукописных копий контрактов на поставу машин и котлов и их спесификация. 60-е гг. XIX в.
36. Стромейер. Морские паровые котлы. Перев. с англ. Голов Д. СПБ, 1895.
37. Тверской Н. Н. Практика морского механического дела. СПБ, 1866.
38. Тонков Р. Законы по паровым котлам и правила для их расчета в России и Германии. СПБ, 1904.

ГЛАВА IV

СУДОВЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ 70—90-х гг. XIX в.[1]

Первые попытки практического применения водотрубных котлов на судах относятся еще к XVIII в. Однако, водотрубные котлы не получили широкого распространения вплоть до 80-х гг. XIX в., несмотря на все старания их изобретателей и строителей.

Одной из основных технических причин, тормозивших применение водотрубных котлов на судах, следует считать плохую циркуляцию (круговое движение) воды в котле.

Эксплоатационные и опытные наблюдения над работой водотрубных котлов показали, что паропроизводительность котла будет больше там, где лучшая циркуляция воды. Последняя должна обеспечивать непрерывный отвод тепла от поверхностей нагрева. Очень важно, чтобы во всем водяном пространстве котла поддерживалась по возможности одинаковая температура воды, а стало быть, и всех металлических стенок котла. В противном случае, из-за неодинакового теплового расширения может произойти образование трещин в котле или расстройство соединений[2].

Для улучшения циркуляции воды предлагалось разрежать кипятильные трубки и увеличивать их диаметр. Позже для этой же цели рекомендовалось помещать в кипятильные трубки специальные циркуляционные трубки.

Прототипом котлов с циркуляционными трубками, вероятно, следует считать котлы Джоли (P. F. Joly), на которые был заявлен патент в Англии в 1857 г. за № 2443.

Котлы же Фильда[3], считаемые многими авторами пионерами котлов с циркуляционными трубами, были изобретены только в 1867 г.

Котлы Фильда применяются в судовых установках, начиная со второй половины XIX в. вплоть до наших дней. Строятся они для небольших производительностей.

80. Котел Фильда

Котел Фильда состоит из вертикально стоящего полого цилиндра, внутри которого расположена топка. В кольцевом пространстве

---

[1] ODJ. Стр. 1037—1043, 1082—1088, 1112—1120, 1143—1150, 1169—1177, 1198—1204, 1232—1238, 1267—1277, 1293—1301. 1896.

Busley C. Die Wasserrohrkessel der Dampfschiffe.

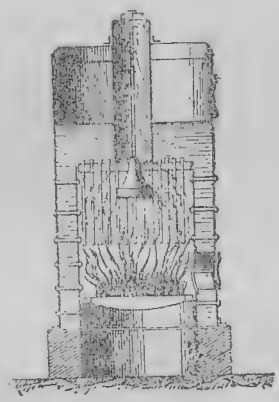
Буслей. Судовые водотрубные котлы. Перев. Голова. СПБ, 1897 и 1903 г.

[2] Жанвие. Правила и руководство для начальника, механика и для управляющего машиной на пароходе. Стр. 16 и 32.

[3] Зейферт. Паровые котлы и паровые машины. ГИЗ. 1928.

цилиндра находится вода. В потолке топки ввальцованы закрытые снизу кипятильные трубки. В последние вставлены открытые сверху и снизу циркуляционные трубки (рис. 88). Часть воды, находящаяся в кольцевом пространстве кипятильной трубки, под действием теплоты топочных газов превращается в пузырьки пара. Последние, как более легкие, поднимаются вверх, увлекая за собой и воду. Освобождающееся пространство вновь заполняется водой, опускающейся по циркуляционным трубкам. Вода оказывает давление сверху вниз на пароводяную смесь в кольцевом пространстве и, тем самым, облегчает и ускоряет ее подъем.

При выходе смеси из кольцевого пространства, пар направляется в паровое пространство котла, а вода снова засасывается водой же, опускающейся по циркуляционным трубкам для заполнения освобождающегося пространства.



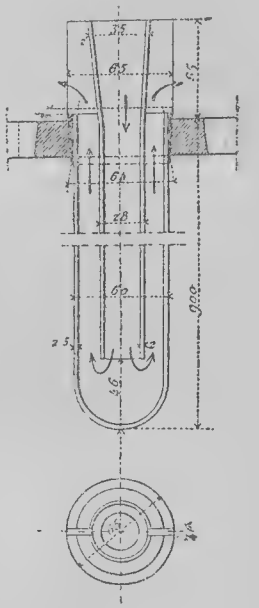


Рис. 88. Котел Фильда.

Интенсивность циркуляции воды влияет на паропроизводительность котла и обусловливает надежность его работы.

Движущаяся в трубках с большой скоростью пароводяная смесь смывает на своем пути часть приставших к поверхности нагрева пузырьков пара, воздуха и углекислоты.

Благодаря этому, улучшаются условия работы котла, так как паровые пузырьки являются плохими проводниками тепла. Их непродолжительная задержка на поверхности нагрева может дать перегрев и разъедание ее.

Первое время котлы Фильда не получили широкого распространения, главным образом, потому, что кипятильные трубки котлов выполнялись из чугуна. Это давало малую надежность работы котлов. Позднее котлы Фильда снабжались железными, а потом и стальными кипятильными трубками.

КОТЛЫ ГРУППЫ БЕЛЬВИЛЯ

81. Котлы Бельвиля (Франция)

Некоторые, как, например, Бельвиль [1], пытались избежать трудностей, вызываемых плохой циркуляцией. Он построил котел, паро-

[1] A. Ledieu. Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation. T. II. стр. 470, Paris, 1865.
VDI. Стр. 1038—1043, 1082—1088, 1896.
TINA. Стр. 1—15, 1898.
TINA. Стр. 267—292, 1896.
TINA. Стр. 86—112, 1894.

образование в котором происходило без циркуляции воды. Патент на этот котел Бельвиль взял 28 августа 1850 г.

Первые опыты с четырьмя котлами Бельвиля были проведены на французском корвете «Biche» в 1855 г. (рис. 89). Котел состоял из нескольких труб. В один конец этих труб поступала вода, а из другого конца выходил пар. По существу рассматриваемый бельвилевский котел являлся прямоточным. Испытания его окончились неудачей, после чего Бельвиль изменил конструкцию котла (рис. 90). Новые котлы Бельвиля были установлены на французском военном судне «Argus».

Этот котел Бельвиля состоял из двух водяных коллекторов, установленных у боковых стенок зольной камеры. От водяных коллекторов вверх по боковым стенкам топки шли железные трубки. Вверху оба ряда трубок изгибались внутрь топки и, зигзагообразно поднимаясь, входили в общий паровой коллектор. Эта последняя часть трубок составляла конвекционную поверхность нагрева.

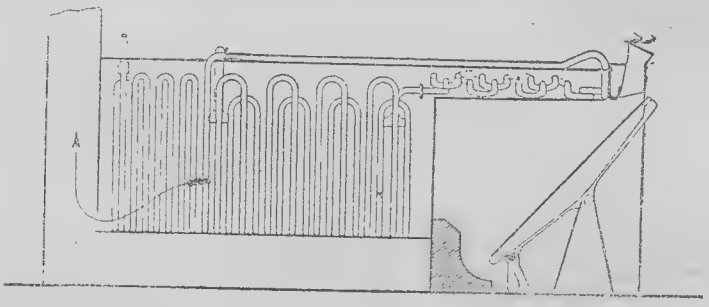


Рис. 89. Первоначальный образец судового котла Бельвиля.

Паровые коллекторы от нескольких котлов присоединялись к одному вертикальному сепаратору, который устанавливался в стороне за обмуровкой котла.

Питательная вода поступала в водяные коллекторы, затем, нагреваясь, поднималась по вертикальным трубкам и в конце конвекционной поверхности нагрева почти вся испарялась. Так осуществлялась основная идея Бельвиля — вводить в котел лишь то количество воды, которое в каждый данный момент необходимо подавать машине в виде пара. Почти никакого запаса воды, совершающего круговое движение в котле, здесь не было [1].

Пар из всех трубок собирался в паровом коллекторе, а из последнего направлялся в сепаратор. В сепараторе пар освобождался от воды и уходил к своему потребителю. Вода, отделяющаяся в сепараторе, поддерживалась примерно на одинаковом уровне. Сепаратор имел водомерное стекло для наблюдения за уровнем воды в нем.

Водяное пространство сепаратора в своей нижней части соединялось с водяными коллекторами. В случае, если уровень воды в котле был ниже уровня воды в сепараторе, вода из последнего могла переходить в водяные коллекторы через невозвратный клапан.

---

[1] Г. Ф. Депп. Паровые котлы. С.-Петербург, 1908. Нем. пат. № 2468, 1877 г. Английские патенты № 4428, 1876 г.; № 3269, 1865 г.; № 3284, 1872 г.; № 15356 1889 г.; № 22250, 1892 г.; № 14868, 1896 г.; № 11782, 1901 г.; № 825, 1897 г.

Топка котла Бельвиля была очень сильно экранирована[1] (рис. 90). На рисунке видна перегородка, которая направляла дымовые газы через всю конвекционную поверхность нагрева. При испытаниях эти котлы дали расход угля 1,75 *кг/и. л. с.* при давлении пара в 7 *ати*.

К числу преимуществ данного котла следует отнести небольшой его вес и хорошо развитую экранированную поверхность нагрева, что давало возможность повысить удельную производительность котла и уменьшить изнашиваемость кирпичной кладки топки.

Недостатками котла можно считать:

1) невозможность внутренней очистки труб от накипи;

2) крайне незначительную скорость воды в кипятильных трубках, допускающую задерживание паровых пузырьков в них. Обе причины могли приводить к местному перегару трубок.

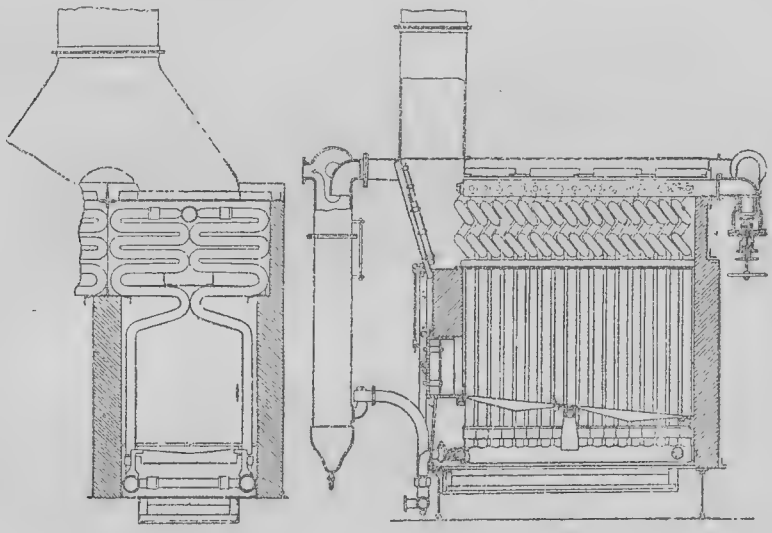


Рис. 90. Котел Бельвиля, установленный на пароходе „Argus".

Вначале Бельвиль предлагал кипятильные трубки в своих котлах ставить чугунными. Только впоследствии чугунные трубки в котлах Бельвиля были заменены железными, сваренными внахлестку, что увеличивало надежность их работы.

В эксплоатации и сварные кипятильные трубки часто рвались в местах сварки, что можно объяснить как двумя упомянутыми причинами, так и плохими котлостроительными материалами и недостаточно хорошей сваркой того времени.

В котлах Бельвиля было очень трудно поддерживать постоянный уровень воды из-за неодинакового распределения питательной воды по трубам.

В 1859 г. сам Бельвиль отказался от данной конструкции котла, так как она не давала хороших практических результатов.

В 1862 г. Бельвиль спроектировал новую конструкцию котла, в которой, кроме положительных сторон его прежней конструкции, была предусмотрена возможность циркуляции воды. Данный котел (рис. 91) состоял из шара, снабженного водомерным стеклом, водяного и паро-

[1] Экраном называются водогрейные трубки, покрывающие стенки топки.

вого коллекторов, кипятильных труб, паросборника и пароперегревателя. Заметим, что патент на трубчатый змеевиковый пароперегреватель был взят Тривитиком еще в 1832 г.

Питательная вода поступала в большой шар через автоматический регулятор питания и невозвратный клапан. Шар соединялся трубами с водяным и паровым коллекторами. Вода из шара поступала в водяной коллектор, оттуда она распределялась по всем кипятильным трубкам. В трубках вода нагревалась до температуры кипения и затем превращалась в пар, который из всех трубок переходил в паровой коллектор. Из парового коллектора пар направлялся в расположенный наверху пароперегреватель, откуда он поступал в паросборник и, наконец, к потребителю пара.

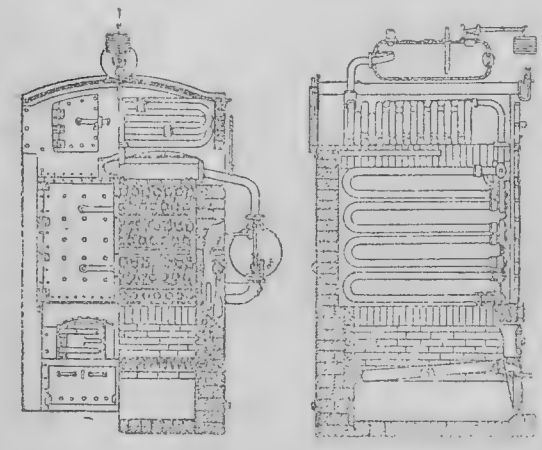


Рис. 91. Бельвилевский котел типа 1862 г.

Этот котел по своей схеме отходит от принципа работы прямоточного котла и приближается к типу обыкновенных водотрубных котлов. Вода в нем могла совершать многократное круговое движение из шара в водяные коллекторы, кипятильные трубки, паровой коллектор и снова в шар, водяной коллектор и т. д.

С 1866 г. котлы Бельвиля стали устанавливать во французском флоте на паровых катерах (рис. 92, 92а).

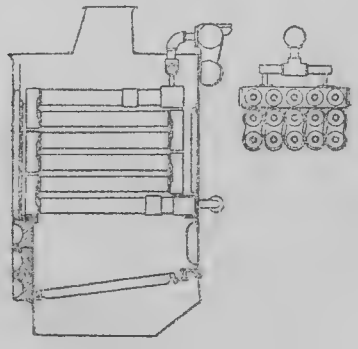


Рис. 92. Катерный котел Бельвиля 1866 г.

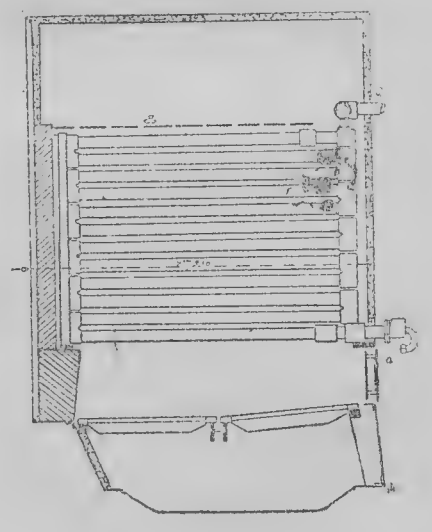


Рис. 92а. Бельвилевский котел типа 1869 г.

Франция одна из первых начала вводить на своих военных судах водотрубные котлы. Это было вызвано желанием повысить тактические свойства военных кораблей. По колониальным торговым интересам Франция занимала в это время непосредственно второе место после владычицы морей Англии. Стремление сохранить это место диктовало необходимость быстрого развития военного флота.

Чрезвычайная программа судостроения, принятая в 1869 г. в Англии, заставила Францию усилить темпы постройки военных судов, а также покровительствовать отечественному котлостроению, особенно в части внедрения на судах водотрубных котлов Бельвиля. В 1870—1871 гг. котлы Бельвиля вместе с построенными на Луаре катерами попали в германский флот.

Рассмотрим конструкцию катерного котла Бельвиля (рис. 93). Водяной коллектор котла квадратного сечения был расположен над топочными дверцами. К нему присоединялись на резьбе кипятильные трубки диаметром 82/70 *мм*, подымавшиеся зигзагообразно в паровой коллектор. Трубки соединялись последовательно друг с другом посредством специальных коробок, изготовленных из ковкого чугуна. Соединение труб выполнялось на резьбе. Упомянутые коробки (рис. 93) имели горловины, закрываемые крышками, которые позволяли производить внутреннюю очистку труб от накипи. Питательная

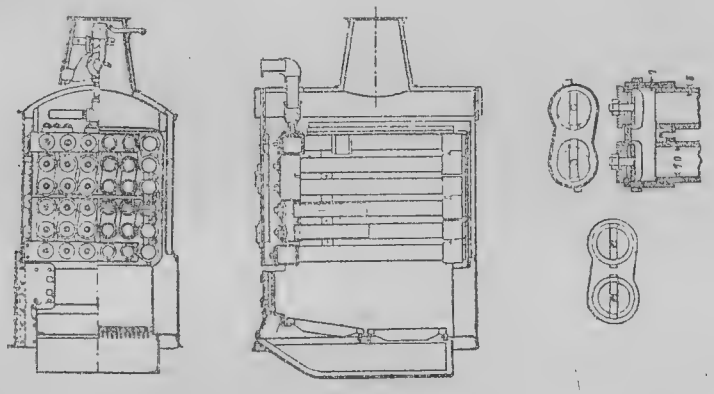


Рис. 93. Бельвилевский котел типа 1868 г. для германских паровых катеров. Сбоку дано соединение трубок в котле.

вода поступала в водяной коллектор, откуда распределялась по кипятильным трубкам. В них она сначала нагревалась до точки кипения, а затем в виде пароводяной эмульсии входила в паровой коллектор.

Обращает на себя внимание устройство кожуха котла. Последний состоял из двух параллельно стоящих листов железа.

Промежуток между листами заполнялся золой. Фронтовая часть кожуха была снабжена дверцами, позволявшими производить внутреннюю очистку труб через лючки, что и являлось преимуществом данного котла по сравнению с предыдущими конструкциями.

К числу остальных преимуществ котла следует отнести небольшой вес его (табл. 25).

Большими недостатками котлов Бельвиля были:

1. Слабая циркуляция воды из-за длинного пути ее в трубках с большим числом поворотов на 180°. Это вело к местным пережогам труб при форсированной работе и к ограничению повышения паропроизводительности котла.

2. Неравномерное распределение воды по трубкам, вызывающее неодинаковый уровень ее в отдельных рядах трубок.

3. Возможность коррозии кипятильных трубок благодаря действию кислорода воздуха, поступающего в них в растворенном виде, вместе с питательной водой. Помимо перечисленных, эти котлы

Таблица 25

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	3,1
Площадь колосниковой решетки	R	$м^2$	0,403
Отношение $H_к$ к R	$\frac{H_к}{R}$	$м^2/м^2$	~8
Мощность котла	N_i	*и. л. с.*	6,5
Паропроизводительность котла	D	*кг*	65
Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	21
Вес котла без воды	$G_к$	*кг*	659
Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	1 302
Вес котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_к}{H_к}$	$кг/м^2$	212
Вес котла с водой на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	130
Вес котла с водой на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/и.л.с.*	200

имели еще целый ряд конструктивных недостатков (например чугунные коробки и др.).

До 1877 г. котлы Бельвиля строились во флоте только для паровых катеров. С 1877 г. Бельвиль начал строить свои котлы для больших военных кораблей и для коммерческого флота.

Строительство котлов Бельвиля с этого момента настолько продвинулось вперед, что уже в 1896 г. часовая паропроизводительность всех его котлов, установленных на французских, английских и русских военных и коммерческих судах, составляла приблизительно 4000 *т* пара.

На рис. 94 показан продольный разрез котла Бельвиля, устанавливавшегося на военных кораблях в 90-х гг. XIX в. Отличается он от предыдущих конструкций тем, что имеет значительно больший паровой коллектор.

Котел состоит из кипятильных трубок, грязевика и чугунных соединительных коробок. Для улучшения циркуляции воды в этих котлах Бельвиль увеличил внутренний диаметр кипятильных трубок до 100 *мм*. У предыдущих котлов трубки имели внутренний диаметр 70 *мм*. Увеличение внутреннего диаметра кипятильных трубок повлекло за собой уменьшение гидравлического сопротивления движению воды пропорционально примерно четвертой степени отношения диаметров.

Питательная вода вначале поступала в паровой коллектор котла, где она быстро нагревалась. Благодаря нагреванию выделялась часть

накипеобразователей и воздух — главнейшие причины коррозии кипятильных трубок котла.

Из парового коллектора вода по циркуляционным трубам *F* спускалась в дежектор, или грязевик (рис. 95, 95а). Грязь и выделившиеся ранее накипеобразователи падали на дно грязевика, а относительно чистая вода поступала из него в водяной коллектор, а оттуда — в кипятильные трубки.

Вода в кипятильных трубках поддерживалась примерно на одинаковом уровне с помощью автоматического регулятора питания.

В котле отсутствовали приспособления, обеспечивающие равномерное распределение воды по отдельным секциям, в результате чего

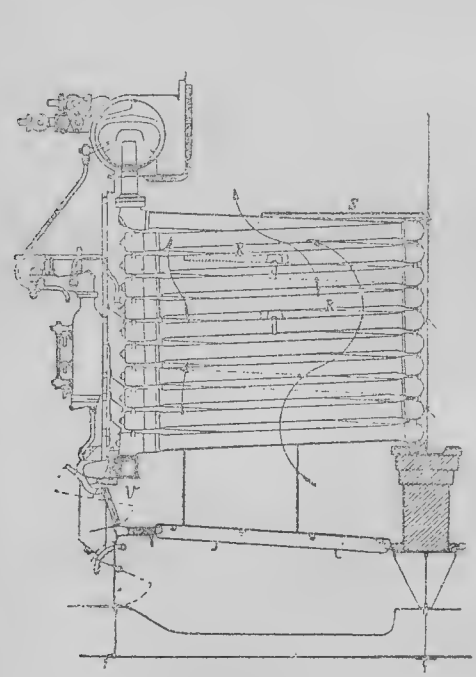


Рис. 94. Продольный разрез бельвилевского котла 1891 г.

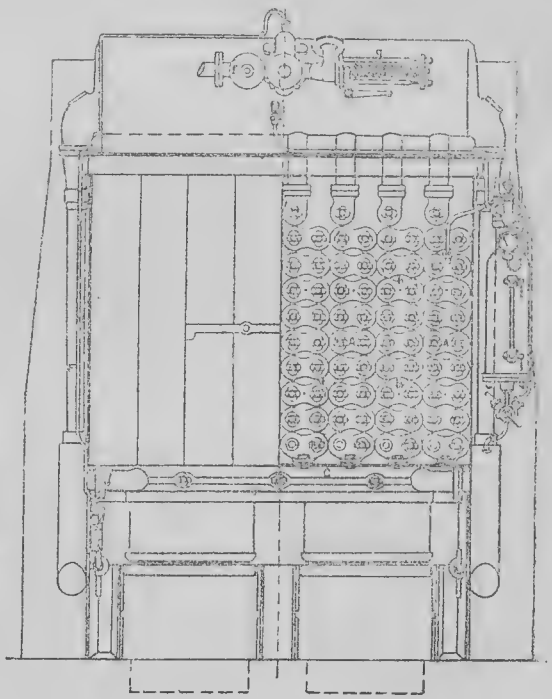


Рис. 95. Вид с фронта бельвилевского котла 1891 г.

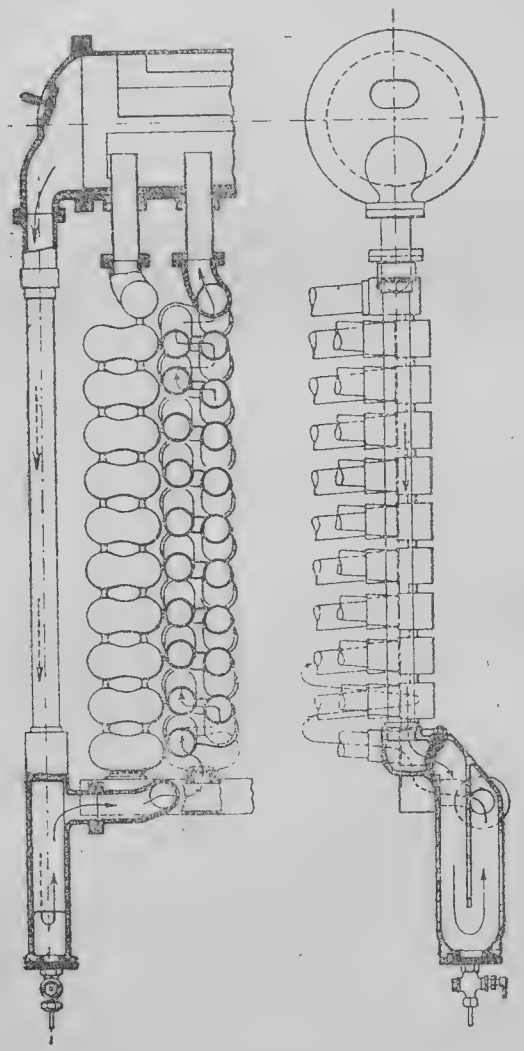
пар в отдельных секциях мог перегреваться, а в других секциях получался очень влажным. Причина неодинакового состояния пара (перегретый и очень влажный) объясняется тем, что одинаковое количество тепла распределялось на разные количества воды, поступающей в отдельные секции.

Сечение соединительных патрубков в секциях вследствие загрязнения могло суживаться, отчего изменялось распределение воды по отдельным секциям котла.

Для уменьшения этого недостатка Бельвиль начал применять свинцовые предохранительные пробки, напоминающие по внешнему виду гвоздь. Предохранительные пробки вставлялись в соединительные коробки на различной высоте. Ими снабжалось несколько рядов трубок.

Из-за неравномерного распределения воды, а также при недостаточном или полном прекращении питания уровень воды в секциях

понижался, и пар в верхних трубках секций начинал перегреваться. Под действием температуры перегретого пара пробки в соединительных коробках расплавлялись, и свист пара из их отверстий давал знать эксплоатационному персоналу о ненормально низком уровне воды в секциях.



с. 95а, Схема циркуляции воды и грязевыделения в котле Бельвиля.

Для восстановления нормального режима работы котла необходимо было выяснить и устранить причину недостаточного питания котла, ослабить горение в топке и подпитать котел до нормального уровня и потом снова поставить пробку.

Если были соблюдены все предосторожности, а пробки все-таки продолжали расплавляться, то причину их расплавления надо было искать в засорении соединительных патрубков коробок с коллекторной питательной трубой или с паровым коллектором.

В этих случаях прекращали работу котла и тщательно осматривали соединительные коробки и патрубки поврежденных и соседних с ними секций. Если они оказывались засоренными, то прочищали их и вновь вставляли пробки.

Для увеличения паропроизводительности трубки котлов Бельвиля снаружи периодически очищались от сажи и золы при помощи струи пара. Такой способ очистки труб был весьма удобен: он позволял легко и просто поддерживать в необходимой чистоте наружную поверхность нагрева котла; но наряду с хорошими качествами этот способ очистки принес с собой и недостатки. Во время обдувки поверхностей нагрева струей пара очень сильно заносилась золой верхняя палуба.

При сжигании же жирных углей производить сдувание сажи с поверхностей нагрева было почти невозможно, но самым главным недостатком такой обдувки — парового банения — кипятильных трубок была большая потеря пара на обдув поверхностей. Часто эту потерю пара даже нельзя было пополнить конденсатом, вырабатываемым имеющимися на судне испарителями. Приходилось добавлять в котлы соленую забортную воду, что вело к ускорению образования накипи.

Во французском флоте в конце XIX в. заменили паровое банение поверхностей нагрева ручной очисткой при помощи щеток. При ручном способе очистки были ликвидированы указанные недостатки, но зато появились другие: перед чисткой приходилось останавливать примерно 1/5 часть котлов на три дня для их остывания, а также производство очистки котлов было весьма вредно и утомительно для рабочих.

Не меньше забот требовала и внутренняя очистка от накипи у бельвилевских котлов. Накипь настолько сильно прикипала к трубкам, что удалять ее вручную при помощи сдирания ершами было физически почти невозможно. Для облегчения ручной очистки труб от накипи было предложено производить предварительное вываривание котлов в течение двух часов раствором соды (3,5—4,5 *кг* соды на элемент котла). Последующие два часа вываривание продолжали при слабом огне с периодическим продуванием солистой воды и пополнением ее остатков пресной водой. Выщелачивание котлов производилось через каждые 10—12 дней плавания.

По эксплоатационным данным, рассматриваемые котлы Бельвиля работали вполне надежно. Это объясняется весьма хорошим качеством выполнения котлов. Последнее, однако, служило и основной причиной высокой стоимости их.

Таблица 26[1]

Название судов	Число и система котлов	Давление пара в котле *ати*	Давление пара в ц. в. д. *ати*	Площадь колосниковой решетки $м^2$	Поверхность нагрева $м^2$	Вес котлов *т*	Стоимость в руб.			Действит. мощность маш. *и. л. с.*
							полная котлов	1 *т* котла	котлов на 1 *и. л. с.*	
		$P_к$	$P_{ц.в.}$	R	$H_к$	$G_к$	$P_к$	$\frac{P_к}{G_к}$	$\frac{P_к}{N_i}$	N_i
Bugeaud, 1893 г.	24 Бельвиля	16,87	11,95	70	2 000	273,3	241 428	883	25,2	9 565
	4 двойн. шотландск.	11,95	11,95	66	2 000	358	188 000	525	20,9	9 000
	4 локом.	11,95	11,95	20,3	1 100	138,5	99 500	718	22,4	4 866

Как показывает табл. 26, котлы Бельвиля были абсолютно и относительно дороже шотландских и локомотивных котлов, хотя они позволяли в значительно большей степени стандартизировать отдельные элементы и тем уменьшили расходы на их производство.

Ремонт котлов Бельвиля производился довольно быстро. Например, трубки могли заменяться примерно в течение 2 часов, несмотря на то, что для замены их приходилось опоражнивать котел и вынимать из кожуха его элементы.

При капитальном ремонте котла или при его замене новым отдельные части можно было подавать через котельные люки. При замене же или ремонте шотландских котлов часто приходилось вырубать палубы над котельными отделениями.

[1] C. Busley. Die Schiffsmaschine. T. I, стр. 643. Kiel & Leipzig, 1901.

Котлы Бельвиля требовали для своего размещения меньшую площадь котельных, чем, например, шотландские и уступали в этом отношении лишь локомотивным котлам (табл. 27).

Таблица 27

Площадь котельных (бельвилевские котлы)

Название судов	Год спуска	Мощность машин, *и. л. с.*	Котельное отделение: Площадь *м²*	Котельное отделение: И.л.с. на 1 *м²* площ. котельной *и.л.с./м²*	Число котлов
		N_i	S	N_i	
	Бельвилевские котлы				
„Alger"	1889	5 089	243	20,9	24
„Latouche Tréville"	1892	7 300	208	35,1	16
„Léger"	1891	2 170	69	31,3	6
„Brennus"	1891	13 810	384	36	32
„Bouvet"	1896	14 000	378	36,9	32
„Charlemagne"	1895	14 500	328	44,1	20
„Powerful" и „Terrible"	1896	25 000	697,7	35,8	48
„Россия"	1896	17 000	520,2	36,2	32
	Шотландские котлы				
„Hohenzollern"	1892	9 635	418	23	4 дв. и 2 орд.
„Kaiserin Augusta"	1892	14 015	488	29	8 дв.
„Wörth"	1892	10,228	350	29,2	12 орд.
	Локомотивные котлы				
„Beowulf"	1890	4 866	159	30,5	4
„Satellit", нем. контрминоносец	1893	4 600	84	54,7	4
„Казарский"	1889	3 500	50	60,5	2

Более полное представление об эксплоатационных и конструктивных характеристиках дают табл. 28 и 29.

По данным табл. 28 вес и габаритные размеры котлов Бельвиля выгодно отличали их от шотландских котлов. Одновременно таблицы показывают, что котлы Бельвиля содержали весьма мало воды, следовательно, были менее опасны в отношении взрывов.

Небольшое содержание воды в котлах Бельвиля обусловило в них и новые недостатки. Котлы потребовали весьма внимательного ухода за их питанием. Настоятельно требовалось, чтобы в каждый данный момент ввод в котел воды и расход пара в нем были одинаковыми; в противном случае от испарения всей воды внезапно могли оголиться и перегореть кипятильные трубки. Для избежания такой опасности Бельвиль снабжал свои котлы автоматическими регуляторами питания.

По эксплоатационным наблюдениям бельвилевские автоматы питания работали хорошо, но иногда они прерывали свое действие вследствие загрязнения их сочленений угольной пылью. Часто автоматы питания Бельвиля выходили из строя из-за осаждения на их внутрен-

Таблица 28

	Обозначение	Размерность	Название судна	
			Werft-pinnasse	Tender „Ulan“
Год постройки	—	—	1875	1876
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	8,0	6,0
Число котлов	—	шт.	1	4
Мощность машин	N_i	*и. л. с.*	20	800
Главные размеры котла: длина	l	*м*	1,0	2,67
Главные размеры котла: ширина	b	„	0,66	2,05
Главные размеры котла: высота	h	„	1,4	2,7
Число топок в котле	—	шт.	1	2
Площадь колосн. решеток	R	$м^2$	0,4	3,0
Поверхность нагрева одного котла.	$H_к$	„	3,1	87,14
Наружный диаметр кипятильных трубок	$d_н$	*мм*	79	100
Толщина стенок трубы	δ	„	5	6,0
Длина труб	$l_{тр}$	*м*	0,693	2,31
Число труб	—	шт.	36	126
Объем парового пространства котла.	$V_п$	$м^3$	0,643	0,643
Объем водяного пространства	$V_{вн}$	„	1,496	0,427
Поверхность нагрева на 1 *и. л. с.*	$\frac{H_к}{N_i}$	$м^2/и.л.с.$	0,15	0,28
Вес одного котла	$G_к$	*кг*	659	13500
Вес одного котла с водой	$G_{к+в}$	„	1302	14990
Вес всех котлов на 1 *и. л. с.*	$\frac{\Sigma G_к}{N_i}$	*кг/и.л.с.*	32,9	67,5
Вес всех котлов с водой на 1 *и. л. с.*	$\frac{\Sigma G_{к+в}}{N_i}$	„	65.0	74,9
Отношение мощности к площади решетки	$\frac{N_i}{R}$	$и.л.с./м^2$	49,6	66.7
Отношение мощности к поверхн. нагрева	$\frac{N_i}{H_к}$	„	15,4	13,3
Паропроизводительность всех котлов.	D	*кг/ч*	—	8000

Продолжение табл. 28

	Обозначение	Размерность	Название судна	
			„Werftpinnasse"	„Tender Ulan"
Паронапряжение поверхн. нагрева.	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	—	23
Вес котла на 1 *м²* поверхности нагрева	$\frac{G_к}{H_к}$	*кг/м²*	212	155
Вес котла с водой на 1 *м²* пов. нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	*кг/м²*	420	172
Вес котла на 1 *т* пара	$\frac{G_к}{D}$	*кг/кг*	—	6,75
Вес котла с водой на 1 *т* пара . .	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/т*	—	7500
Объем, занимаемый котлом, отнесенный к поверхн. нагр. котла .	$\frac{V_к}{H}$	*м³/м²*	0,3	0,17
Объем, занимаемый котлом, отнесенный к паропроизводительности котла	$\frac{V_к}{D}$	*м³/т*	—	7,4

них частях накипеобразователей. Повреждение автоматов питания нередко приводило к несчастным случаям.

Несмотря на ряд принятых мер, в частности увеличение диаметра кипятильных трубок, циркуляция в котлах Бельвиля оставалась слабой и не допускала больших форсировок. Во французском флоте даже были даны инструкции о том, что весовое напряжение решетки не должно превышать 150 *кг/м²ч*.

Недостатком котельных установок Бельвиля была также небольшая высота топки. Горящие газы до вступления в междутрубное пространство не успевали догорать. Там же горение газов прекращалось, из-за чего создавались большие потери от химической неполноты горения. Для уменьшения последних Бельвиль в своих котлах начал применять ввод в топку сжатого воздуха под давлением в 0,35 *ати*.

Сжатый воздух вводился в топку над топочными дверцами и направлялся вниз к решетке. Предполагалось, что этот воздух затормозит подъем горящих газов, т. е. удлинит время их пребывания в топке и тем обеспечит более совершенное их сгорание. Кроме того, сжатый воздух, вводимый в топку, частично мог использоваться для сгорания летучих веществ топлива.

Этот способ борьбы за уменьшение потерь от химической неполноты сгорания на практике себя мало оправдал. К. п. д. увеличивался незначительно, а между тем котельная установка сильно усложнялась как трубопроводом, так и большими и громоздкими воздуходувками.

Более реальный эффект в отношении повышения к. п. д. дали

Таблица 29[1]

Наименование	Обозначение	Размерность	Год постройки			Английский крейсер „Terrible", 1894					
			1879	1882	1884	№ опытов					
			Крейсер „Voltigeur"	Авизо „Milan"	Почтовый пароход „Ortegal"	1	2	3	4	5	6
Продолжительность опытов	Z	час.	—	—	—	60	60	60	60	8	4
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	6,5/4,25	14/9	12/6	15,3	16,2	15,6	16,4	16,9	16,9
Число работающих котлов	—	шт.	6	12	8	20	32	48	48	48	48
Сумма поверхностей нагрева котлов.	$\Sigma H_к$	$м^2$	289,25	1034	689,42	1690	4300	6450	6450	6450	6450
Сумма площ. колосниковых решеток.	ΣR	»	9	33,84	22,56	85	136	204	204	204	204
Развиваемая мощность	N_i	*и. л. с.*	1000	4133	2100	5084	10246	15553	18775	23050	25115
Паропроизводительность котлов .	D	*т/ч*	10	41,33	21	38	76	116	139	173	188
Паронапряжение пов. нагрева . .	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	34,6	40	30,5	14	18	18	21,5	27	29
Сожжено угля в час	B	*кг/ч*	1028	4460	1950	5290	8830	13800	18300	22300	24100
Весов. напряж. решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	115	132	87	62	65	68	90	110	118
Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и.л.с.*	1,028	1,08	0,93	1,04	0,86	0,89	0,99	0,97	0,96
Вес котлов с водой и принадлежностями	$G_{к+в}$	*т*	50,4	159	115	—	—	—	—	—	—
Вес котла с водой на 1 *т* пара .	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*т/т*	5,04	3,85	5,5	—	—	—	—	—	—
Вес котла с водой на 1 $м^2$ пов. нагрева.	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	*кг/м²*	174	154	167	—	—	—	—	—	—
Вес котла с водой на 1 *и. л. с.* . .	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/и.л.с.*	50,4	38,5	55,0	—	—	—	—	—	45,3
Видимая испарительность топлива.	$И_в$	*кг/кг*	9,8	9,3	10,7	7,2	8,6	8,4	7,6	7,8	7,8
Ср. примерн. к. п. д. котла	$\eta_к$	%	68	64	74	50	59	58	52,5	54	54

[1]См. Военный Флот. Стр. 367, 1901.

водяные экономайзеры, устанавливаемые над котлом (рис. 96). Последними начали снабжать бельвилевские котлы, начиная с 1896 г. В табл. 30 приводятся основные данные о размерах экономии, получаемой от использования тепла уходящих газов водяными экономайзерами. Испытания производились на заводе Бельвиля над одним из котлов для французского броненосца «Furieux», перестраивавшегося в 1896 г. Основные характеристики этого котла следующие:

Площадь колосниковой решетки	R	$м^2$	4,16
Поверхность нагрева котла	$H_к$	„	87,15
Поверхность нагрева экономайзера	$H_{эк}$	„	51
Суммарная поверхность нагрева	$H_{к+эк}$	„	138

Таблица 30

	Обозначение	Размерность	№ опытов			
			1	2	3	4
Испарено воды на 1 *кг* угля . .	$И$	*кг/кг*	11,6	10,2	9,3	8,6
Весовое напряжение решетки .	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2\,ч$	39	73	102,5	146,5
Давление пара	$P_к$	*ати*	17,3	16,0	16,3	16,5
Тяга у основания дымовой трубы.	$\Delta S_{тр}$	*мм* вод. ст.	5,5	4,3	12,7	19,05
Температура газов у основ. дым. трубы	$t_{ух}$	°Ц	145	220	328	430
Температура воды перед экономайзером	$t'_{эк}$	°Ц	29,6	30,7	27	26,3
Температура воды после экономайзера	$t''_{эк}$	°Ц	78,1	85,6	107,4	132
Использование тепла газов в экономайзере	$q_{эк}$	%	8,6	8,6	12,5	16

Как показывают данные этой таблицы, за счет постановки экономайзеров можно повысить к. п. д. котла на 8—16%.

Расход угля на 1 *и. л. с. ч* на первых судовых котлах Бельвиля был относительно велик. Во время пробного рейса французского броненосца «Brennus», оборудованного машинами тройного расширения, котлы Бельвиля расходовали вначале $\frac{B}{N_i} = 1{,}905$ *кг* угля на 1 *и. л. с. ч*, но когда кочегары освоили процесс обслуживания котлов Бельвиля $\frac{B}{N_i}$ — расход угля на 1 *и. л. с. ч* понизился до 1,09 *кг/и. л. с. ч*. В конечном итоге при самом экономичном ходе $\frac{B}{N_i}$ удалось довести до 0,82 *кг/и. л. с. ч*.

Достаточно полное представление об экономичности работы судовых установок с котлами Бельвиля могут дать табл. 31 и рис. 96a, 96b, 96c.

На рис. 96a показаны кривые расхода угля в зависимости от мощности для крейсеров I класса «Terrible» и II класса «Powerful». Испы-

тания производились в 1896 г. Во время испытания среднее давление пара в котле поддерживалось равным 15—16 *ат*.

Первые два испытания на меньших мощностях продолжались 30 час., а два остальные — по 4 часа. По данным этих испытаний, средний вес котлов на 1 *и. л. с.* получился равным $\frac{G_к}{N_i}$ =45,3 *кг/и. л. с.*, а вес машин $\frac{G_м}{N_i}$ = 42,6 *кг/и. л. с.*

Примерно такие же данные дали испытания крейсеров II класса: 1) «Gladiator», 2) «Arrogant», 3) «Furious», 4) «Vindictive» (рис. 96b). Каждый крейсер был снабжен 18 котлами Бельвиля без экономайзеров. Испытания продолжались по 30 час. Расход угля во время испытания определялся лишь при мощностях порядка 2000 и 7000 *и. л. с.* По данным испытаний вес котлов $\frac{G_к}{N_i}$ = 44,8 *кг/и. л. с.*, а вес машин $\frac{G_м}{N_i}$ = 37,15 *кг/и. л. с.*

Значительно большая экономичность установки получилась на крейсерах II класса: 1) «Diadem», 2) «Europa», 3) «Niobie», 4) «Andromeda», 5) «Amphitrite» (рис. 96c). На последних были установлены котлы Бельвиля с экономайзерами. Вес котлов у первых четырех крейсеров составил

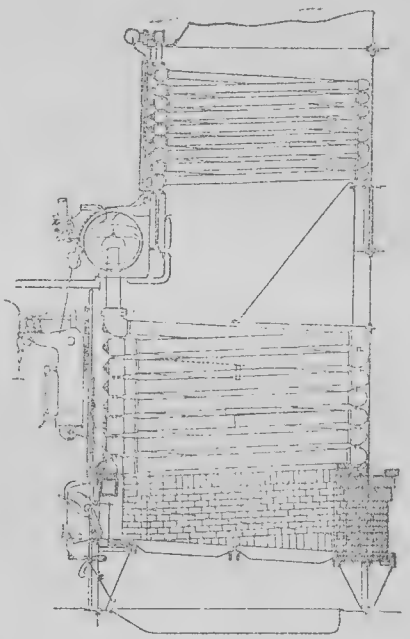


Рис. 96. Бельвилевский котел типа 1896 г. с экономайзером. Продольный разрез.

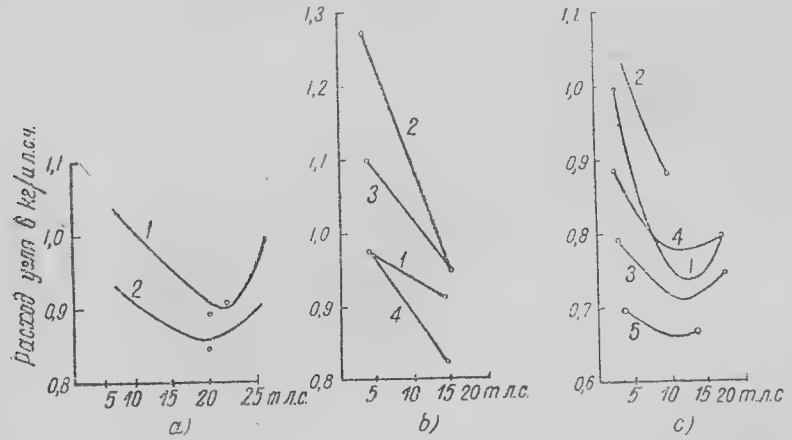


Рис. 96a, 96b и 96c. Характеристики работы бельвилевских котлов.

$\frac{G_к}{N_i}$ =45,75 *кг/и. л. с.*, а вес машин у них $\frac{G_м}{N_i}$ =46,66 *кг/и. л. с.* Особенно большой к. п. д. установки (рис. 96c) был получен на крейсере «Amphitrite», хотя вес машин у него составлял $\frac{G_м}{N_i}$ = 42,1 *кг/и. л. с.*,

Таблица 31

Название судов	Год спуска судов	Неполный ход		При полном ходе	
		Мощность N_i	Расход угля на 1 *и. л. с.* $\frac{B}{N_i}$	Мощность N_i	Расход угля на 1 *и. л. с.* $\frac{B}{N_i}$
		и. л. с.	*кг/и.л.с.ч*	*и. л. с.*	*кг/и.л.с.ч*
Крейсер „Powerful"	1896	5000	0,93	18500	0,83
„ „Terrible"	1896	5000	1,18	1850	0,77
„ „Aboukir"	1900	4597	0,86	21375	0,83
Крейсер „Bacchante"	1901	4624	0,82	21520	0,77
„ „Sutlej"	1899	4644	0,907	21261	1,07
„ „Hogue"	1900	4738	0,95	21432	0,93
Броненосец „Vengeance"	1899	2885	0,77	13852	0,78
„ „Formidable"	1898	3281	0,916	15511	0,82
„ „Implacable"	1899	3179	0,88	15244	0,85
„ „Irresistible"	1898	3243	1,09	15603	0,9
„ „Bulwark"	1899	3174	0,82	15353	0,83
„ „Leviathan"	1901	6481	0,77	—	—
„ „Drake"	1901	6937	0,77	—	—
„ „Good Hope"	1901	7253	0,82	31071	0,86

а вес котлов $\frac{G_к}{N_i} = 42{,}5$ *кг/и. л. с.* Все пять крейсеров испытывались в период 1898—1899 гг.

В русском флоте примерно с 1902 г. котлы Бельвиля строились без экономайзеров. Это было вызвано следующими причинами:

1) засорением труб экономайзера выделявшимися накипеобразователями и золой,

2) жалобами на коррозию трубок экономайзеров,

3) усложнением обслуживания котла вследствие увеличения числа лючков за счет экономайзера.

Выгодной особенностью котлов Бельвиля был их небольшой вес. Например, на французском крейсере «Bugeaud», машины которого развивали мощность 9565 *и. л. с.*, отношение суммарной мощности паросиловой установки к суммарному весу котлов составляло 26,2 $\frac{и.\ л.\ с.}{\text{тонну в. к.}}$ против 20—25 $\frac{и.\ л.\ с.}{\text{тонну в. к.}}$ у кораблей, снабженных шотландскими котлами, работающими при форсированной тяге.

Невыгодной особенностью котлов Бельвиля было слишком большое влагосодержание пара и резкое колебание давления вследствие изменения уровня воды в котле. Для осушения пара Бельвилю пришлось поставить довольно сложный паросушитель (сепаратор), помещаемый в паровом коллекторе (рис. 97). Кроме того, на паропроводе ставился еще общий сепаратор (рис. 98—98а).

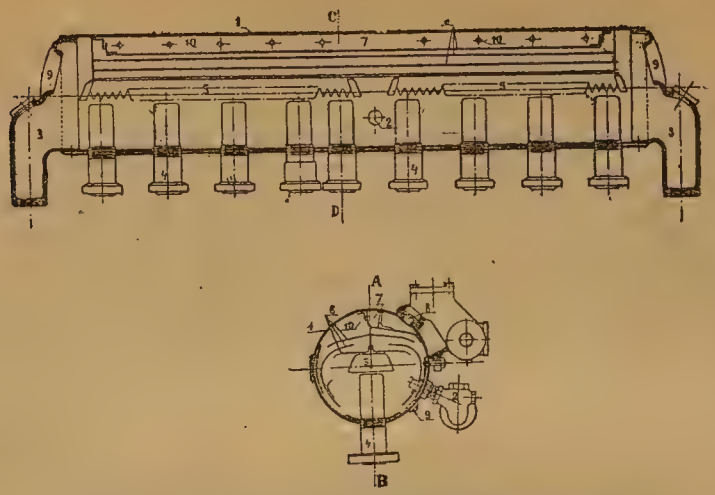


Рис. 97. Паросушитель бельвилевских котлов.

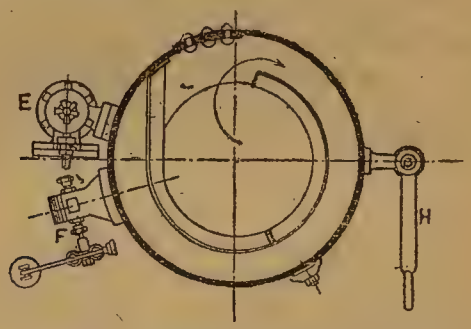


Рис. 98а. Горизонтальное сечение общего сепаратора.

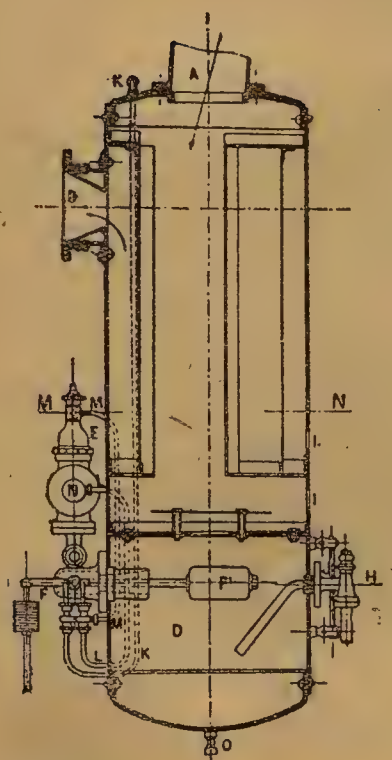


Рис. 98. Вертикальное сечение общего сепаратора.

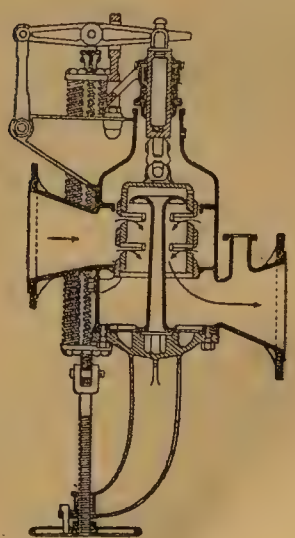


Рис. 99. Детандер Бельвиля.

Высокое влагосодержание может быть объяснено крайне малым водяным пространством. Пар в месте своего образования имеет скорости, лишь немногим меньшие, чем в паропроводе. При таких условиях паром захватывается большое количество воды.

Колебания же давления пара в котле Бельвиля происходят оттого, что водяное и паровое пространство котла слишком малы.

При малейшем несоответствии количества тепла, передаваемого поверхности нагрева, соотношения объемов водяного и парового пространства резко меняются, что вызывает изменение давления пара.

Чтобы поддерживать перед машиной постоянное давление, Бельвиль поставил между котлами и машиной редукционный клапан или детандер (рис. 99). Последний дросселировал пар до постоянного давления, скрадывая тем самым колебания давления выше того предела, на который был поставлен редукционный клапан.

Подводя итоги работы котлов Бельвиля последних типов, подчеркнем еще раз их преимущества и недостатки. К числу основных преимуществ котлов Бельвиля можно отнести:

1) возможность полной стандартизации отдельных элементов котла при небольшом весе и размерах их, что ускоряло и облегчало производство ремонта,

2) высокую удельную паропроизводительность котла,

3) небольшой вес на 1 *и. л. с.*,

4) возможность внутренней и наружной очистки и осмотра кипятильных труб в сравнении с шотландскими котлами,

5) быструю разводку пара ($1^1/_2$ часа),

6) малую вероятность коррозии кипятильных трубок,

7) высокую прочность,

8) сравнительно легкую разборку,

9) очень малое водяное пространство.

Наиболее ценные преимущества, указанные в пп. 1, 3, 7, были использованы впоследствии и многими другими конструкторами при разработке своих котлов.

Основными недостатками котлов Бельвиля можно считать:

1) возможность появления течи в соединительных коробках от быстрых изменений температуры дымовых газов,

2) очень малую поверхность водяного уровня котла, что не допускало большой форсировки работы,

3) возможность перегрева отдельных элементов котла, вследствие неравномерного распределения воды по секциям, вызывавшего перегрев пара в последних,

4) плохую циркуляцию [1] воды в котле, ограничивающую повышение паропроизводительности. Это объясняется малым напором воды, недостаточным для преодоления больших гидравлических сопротивлений в элементах котла,

5) небольшие как высоту, так и объем топки, вследствие чего наблюдались частые случаи больших потерь от химической неполноты горения.

Появление котлов Бельвиля ускорило прогресс котельной техники, и перечисленные здесь недостатки при нормальной нагрузке (естественная тяга) не имели большого значения.

Котел Бельвиля до конца XIX в. оставался ведущим типом водотрубных котлов. До 1900 г. на 116 военных судах было установлено

[1] Transactions of the Institution of naval architects. Стр. 267—292. London. 1896.

и находилось в постройке (табл. 32) 2025 котлов Бельвиля с общей мощностью 1 309 000 *и. л. с.*

Таблица 32

Число котлов Бельвиля, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. (включительно)

№ по пор.	Наименование стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	Великобритания	43	850	550 000
2	Франция	35	512	300 000
3	Япония	14	292	170 000
4	Россия	16	227	100 000
5	Австро-Венгрия	3	50	33 000
6	Чили	2	34	19 000
7	Германия	1	12	10 000
8	Аргентина	1	24	13 500
9	Италия	1	24	13 500
		116	2 025	1 309 000

82. Котлы Перкинса (Англия)

Попытку устройства судового котла с малыми водяным и паровым пространствами, похожего на котел Бельвиля, сделал инженер Перкинс, взявший в 1871 г. патент за № 2819 на изобретенный им котел[1]. На рис. 100 показан котел Перкинса, установленный им в 1879 г. на яхте «Anthracite». Основные характеристики его приведены в табл. 33.

Топка котла полностью заэкранирована. Трубки экрана соединяются между собой патрубками. Экран в свою очередь соединен с отдельными секциями конвекционного пучка труб посредством муфт на резьбе. Для плотности между концами трубок прокладывалась мягкая медная прокладка. Вода поступала в нижнюю часть экрана, по мере нагревания подымалась вверх и входила в конвекционную поверхность нагрева котла. В последней вода превращалась в пар, который собирался в паровом коллекторе. Нижняя половина кипятильных труб во время работы была заполнена водой, а верхняя заполнялась паром. Котел был снабжен водомерным стеклом для наблюдения за поддержанием воды в кипятильных трубках на соответствующей высоте.

Первое 11-часовое испытание котла Перкинса, проведенное 22 мая 1880 г., дало следующий результат: часовой расход угля на 1 *и. л. с. ч* составлял 0,9 *кг*, развиваемая мощность машин равнялась 70—90 *и. л. с. ч.*

13 и 14 августа 1880 г. в Нью-Йорке было проведено более обстоятельное 24-часовое испытание котла Перкинса (табл. 33), во время которого часовой расход угля на 1 *и. л. с. ч* составлял 1,22 *кг*. Такой

[1] VDI. Стр. 1084, 1896; Busley. Die Entwicklung der Schiffsmaschine. Стр. 155—157, Berlin, 1892.
The Marine Engineer. Стр. 8, 1881.
Англ. патенты № 1822 1871 г.; № 2819 1871 г.

повышенный расход угля может быть объяснен большими (8 *ати*) потерями давления в паропроводе. Испарительность же топлива была равна 5,3.

Выгодной особенностью котла Перкинса является его небольшой вес ввиду отсутствия паровых и водяных коллекторов больших диаметров. Если же сравнивать вес котлов Перкинса и Бельвиля, отнесенный к 1 *и. л. с.*, то оказывается, что вес котла Перкинса равен 107 *кг/и. л. с.*, т. е. он в 2,3 раза больше, чем у котлов Бельвиля

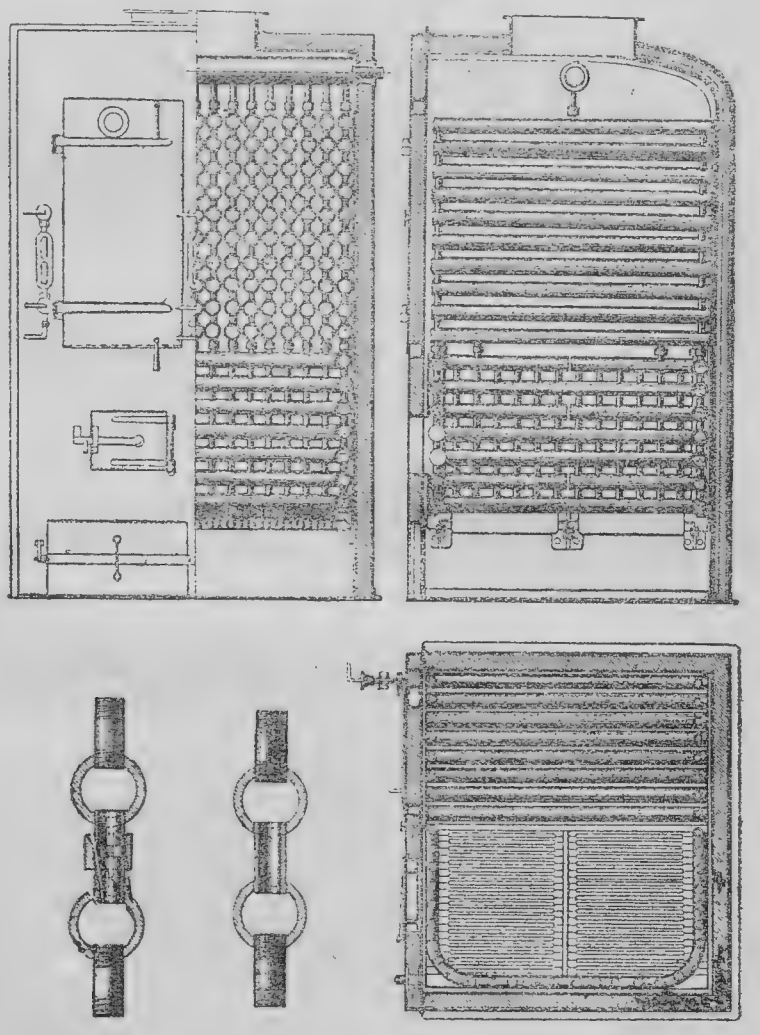


Рис. 100. Котел Перкинса.

($\frac{G_к}{N_i} = 45$). Столь высокое отношение веса котлов Перкинса к мощности, развиваемой ими, объясняется очень плохой циркуляцией воды в котле, ограничивающей повышение паропроизводительности в нем.

Существенным недостатком котлов Перкинса являлось и вскипание воды в котле при повышении его нагрузки.

Все вышеупомянутые недостатки не дали возможности котлам Перкинса получить широкое распространение.

Таблица 33

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Опытные данные
1	Среднее рабочее давление в котле	$P_к$	*ати*	22
2	Поверхность нагрева	$H_к$	$м^2$	58
3	Площадь колосниковой решетки	R	„	1,4
4	Котлостроительный материал			железо
5	Диаметр кипятильных трубок	$\varnothing$	*мм*	76/57
6	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	7 250
7	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	22
8	Давление пара передн. машины	$P_м$	„	14
9	Мощность	N_i	*и. л. с./ч*	67,7
10	Часовой расход угля	B	*кг/ч*	83
11	Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	1,22
12	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	63
13	Испарено воды в час, нагретой до 100°Ц .	$D_ч$	*кг/ч*	520
14	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	8,9
15	Вес котла на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/т*	14 000
16	„ „ „ 1 *и. л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	107
17	„ „ „ 1 $м^2$ поверхности нагрева . .	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	125
18	Испарено воды от 0°Ц на 1 *кг* топлива . .	$И_в$	*кг/кг*	5,3
19	Ориентировочный к.п.д.	η	%	37,5

83. Котел Геррешофа (Англия)

Весьма оригинальную конструкцию водотрубного котла с малым водяным и паровым объемом изобрел в 1876 г. Геррешоф. Первый котел Геррешофа был испытан в 1878 г. (рис. 101). Это был прямоточный котел, состоявший из железной трубы длиной в 200 *м*, сваренной из отдельных трубок.

Парообразование в котле Геррешофа схематически может быть представлено так: вода специальным насосом нагнетается в нижний

конец наружного трубчатого цилиндра[1]. Пройдя последний и его потолок, вода нагревается до температуры, близкой к кипению. Затем она поступает в потолок внутреннего трубчатого колокола и, пройдя его сверху вниз, превращается в пароводяную эмульсию с содержанием воды примерно в 15—20%.

Из нижнего конца трубы колокола пароводяная смесь вступает в расположенный сбоку котла сепаратор. В нем происходит сепарация — отделение воды от пара. Осушенный таким образом пар поступает в паровую машину, а отделенная в сепараторе вода отсасывается из него насосом. Перед вступлением в котел вода очищается в фильтрах.

Основные конструктивные и опытные характеристики котла даны в табл. 34.

Таблица 34

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Опытные данные
1	Поверхность нагрева	$H_к$	$м^2$	13,9
2	Площадь колосниковой решетки	R	$м^2$	1,14
3	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	10,5
4	Диаметр кипятильных трубок	$d_т$	*мм*	76—51—38
5	Мощность котла	N_i	*и. л. с.*	68,4
6	Паропроизводительность котла	D	*т/ч*	0,255
7	Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	40
8	Сожжено стандартного угля в 1 час	B	*кг/ч*	128
9	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	112
10	Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и. л. с. ч*	1,87
11	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*т*	0,545
12	Вес котла с водой на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	8
13	Вес котла с водой на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	39
14	Вес котла с водой на тонну пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*т/т*	1
15	Ср. видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	4,37
16	Средний к.п.д. котла	$\eta_к$	%	37,5

[1] VDI. Стр. 1035—1087, 1896.
Engineering. T. I, стр. 32, 93, 127, 1879.
TINA. Стр. 317—334, 1887.

Такой же котел Геррешофа был поставлен на паровую яхту «Now then»[1]. Как показывает таблица, паронапряжение у прямоточных котлов Геррешофа составляет $\frac{D}{H_к} = 40$ *кг/м²ч*, т. е. примерно в 1,5 раза больше, чем в котлах Бельвиля.

Особенно выгодно отличается прямоточный котел Геррешофа от других котлов своим небольшим весом. У него $\frac{G_{к+в}}{N_i}$, $\frac{G_{к+в}}{D}$ и $\frac{G_{к+в}}{H_к}$ приблизительно в 6—4 раза меньше, чем у бельвилевских котлов. Тем не менее, несмотря на хорошие характеристики, прямоточные котлы Геррешофа не получили большого распространения.

Обслуживание котла требовало от эксплоатационного персонала огромного напряжения сил и большого навыка в работе, но и при этих условиях прямоточные котлы не могли работать надежно продолжительное время. Технические средства топливосжигания (ручная колосниковая решетка) не обеспечивали основного условия надежной работы прямоточных котлов — передачи поверхностям нагрева в каждый данный момент строго определенного количества тепла, требуемого для образования нужного количества пара. Из-за невозможности установить должный синхронизм в расходе пара и сообщении воде тепла (расходе топлива) пар получался либо очень влажным, либо очень перегретым. Как первое, так и второе обстоятельство весьма вредно отражались на работе машин и даже могли повлечь за собой их повреждение.

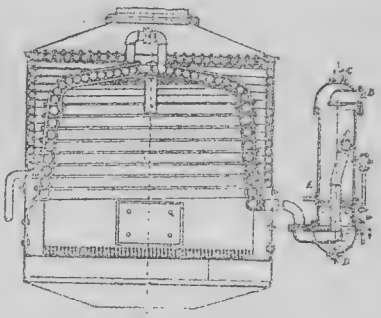


Рис. 101. Прямоточный котел Геррешофа 1878 г.

Кроме того, эти котлы требовали весьма тщательной очистки воды от накипеобразователей. Небольшое их присутствие в воде могло повлечь за собой пережог участка расположенной в топке трубы, находившейся в весьма тяжелых термических условиях.

Рассматриваемый котел имел весьма малый водяной объем, вследствие чего при остановке машины почти вся вода в котле превращалась в сильно перегретый пар, что также могло вызвать пережог трубок.

Очистка внутренней поверхности нагрева в котлах была невозможна.

Все это привело к тому, что гениальнейшая идея устройства прямоточного котла не могла тогда получить успеха. Конструкция в условиях того времени оказалась несвоевременно появившейся в свет.

После неудачных результатов испытания выше рассмотренного котла Геррешоф изобрел другой водотрубный котел, который был построен в 1888 г. для паровой яхты «Jersey Lily». По своему устройству этот котел напоминал собой уже рассмотренные ранее котлы Бельвиля.

Котел выполнялся из 22 секций (рис. 102), образующих конвекционную поверхность нагрева, и 2 секций, составляющих боковые

[1] The Engineer. T. II, стр. 227, 1887.
Engineering. T. I, стр. 365, 1879.
Transactions of the institution of naval architects. Стр. 331, 1887.

экраны топки. Каждая секция состояла из 5 горизонтальных труб, соединяющихся между собой посредством коробок, сделанных из ковкого чугуна.

Над конвекционной поверхностью нагрева был расположен водяной экономайзер, представляющий собой трубу, составленную из трех рядов отдельных трубок. Ряды труб водяного экономайзера были расположены крестообразно по отношению друг к другу.

Питательная вода насосом подавалась в водяной экономайзер, откуда, уже подогретой, поступала в вертикально стоящий сепаратор.

От нижней части сепаратора шли две трубы. Вода из сепаратора по этим трубам направлялась обратно в секции котла и экрана. По пути она проходила грязевик, расположенный у задней стенки зольной камеры. От грязевика шло 11 раструбов. Через патрубки, образующие собой задний экран, раструбы соединяли все 22 секции конвекционной поверхности нагрева.

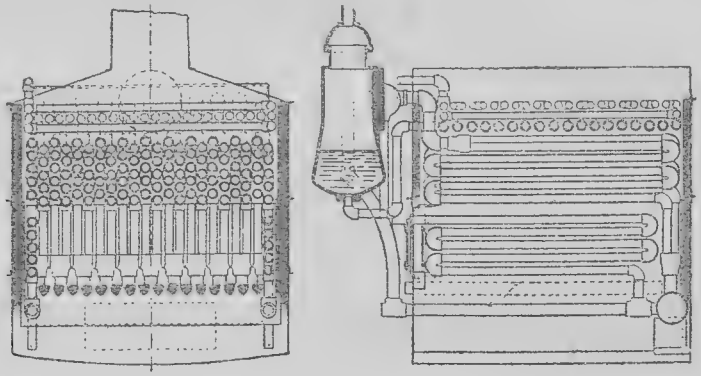


Рис. 102. Секционный котел Геррешофа 1888 г.

Секции соединялись с грязевиком попарно. Секции конвекционного пучка труб были смещены относительно друг друга на $^1/_2$ шага, что давало возможность расположить трубы конвекционной поверхности нагрева в шахматном порядке. Как известно, шахматное расположение труб дает наибольший коэфициент теплопередачи [1].

Пар, образовавшийся в секциях котла и экрана, собирался в паросушитель, расположенный перед фронтом котла, а оттуда направлялся в сепаратор. Из последнего пар через верхнюю трубу направлялся в паровую машину.

Ниже мы приводим табл. 35 основных и опытных характеристик рассматриваемого котла, установленного на пароходе «Jersey Lily».

Результаты испытаний показали, что нагрузка котла, судя по весовому напряжению решетки, была раза в два меньше нормальной, так как циркуляция воды в котле почти отсутствовала. Слабая циркуляция воды в котлах Геррешофа может быть объяснена, с одной стороны, небольшим напором воды в котле, недостаточным для преодоления гидравлических сопротивлений, и, с другой стороны, уменьшением диаметра кипятильных трубок почти в два раза по сравнению с последними типами котлов Бельвиля (1890 г.).

Невозможность внутренней очистки котла от накипи была вторым существенным недостатком котлов Геррешофа. К этому еще необхо-

[1] Annual report of the chief of the bureau of steam engineering for the year. Стр. 48, Washington, 1888.

димо добавить возможность коррозии экономайзера кислородом воздуха, растворенным в питательной воде (температура воды перед экономайзером равнялась 16,7° Ц).

К числу выгодных особенностей котла Геррешофа необходимо отнести очень небольшой их вес, а именно вес котла Геррешофа с принадлежностями, установленного на яхте «Jersey Lily», был равен 1,315 *т*, а вес воды в нем составлял всего 0,0410 *т*, т. е. только $^1/_{28}$ часть веса всего котла. Отношение веса котла к его часовой паропроизводительности составляло 5,15 *кг*, т. е. примерно в 1,2 раза меньше данного отношения у котлов Бельвиля.

Из-за невозможности в то время преодолеть указанные недостатки котлы Геррешофа не получили широкого распространения, если не считать нескольких котлов, построенных для американских яхт.

Таблица 35

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Конструктивные и опытные данные
	Дата испытания			19/IV 1888
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	19,1
2	Площадь колосниковых решеток	R	$м^2$	0,836
3	Диаметр кипятильных трубок	$\frac{d_н}{d_{вн}}$	*мм*	55/50
4	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	8,45
5	Паропроизводительность котла	D	*кг/ч*	255
6	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	13,4
7	Сожжено угля за 1 час	B	*кг/ч*	41
8	Весовое напряжение колосниковой решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	63
9	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	1 356
10	Вес котла без воды	$G_к$	*кг*	1 315
11	Вес котла с водой на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	71
12	Вес котла с водой на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*т/т*	5,32
13	Средняя видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	6,37
14	Средняя станд. видимая испарительность топлива ($\Delta i = 540$ *кал/кг*)	$И_с$	„	7,5
15	Средний к.п.д. котла	$\eta_к$	%	51

84. Котлы Робертса (США)

Из других котлов с малым водяным объемом некоторое значение имел котел Робертса, который по своей конструктивной схеме представлял собой комбинацию котлов типа Бельвиля и Геррешофа (рис. 103) [1]. Он состоял из парового коллектора, двух водяных экранных коллекторов и пучка зигзагообразно согнутых кипятильных труб.

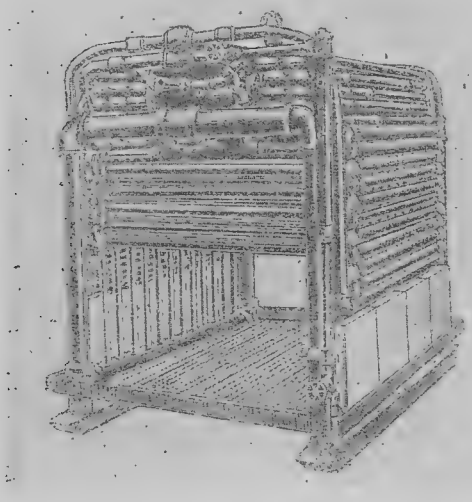


Рис. 103. Котел Робертса без наружного кожуха.

Паровой коллектор с обоих концов соединялся с экранными коллекторами при помощи двух вилкообразных циркуляционных труб. В экранные коллекторы ввинчивался ряд вертикальных трубок, образующих боковые экраны. Вверху эти трубки соединялись с батареями кипятильных труб, которые другими концами входили в нижнюю часть парового коллектора (рис. 104).

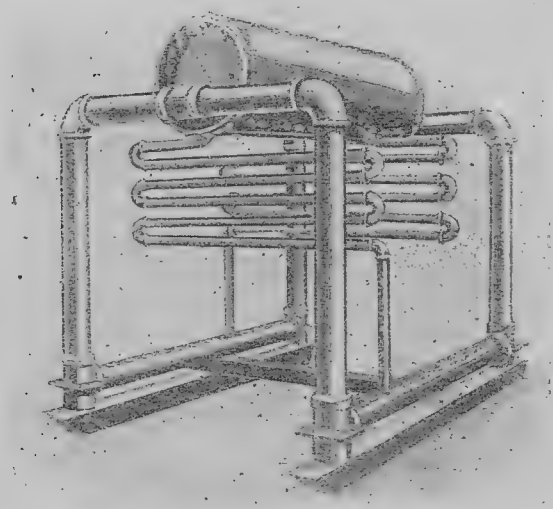


Рис. 104. Остов котла Робертса с двумя системами трубок.

Батареи состояли из зигзагообразно соединенных прямых отростков. Для облегчения циркуляции каждая трубка, входящая в батарею, имела небольшой уклон. Для питания батарей водой котлы Робертса имели не один коллектор, а два.

Пароперегреватель в котле Робертса был расположен по обеим сторонам парового коллектора над батареями кипятильных труб. Он также состоял из зигзагообразно соединенных прямых отростков труб.

Образование пара и циркуляция воды в котлах Робертса происходили так же, как и в котлах Бельвиля. Котлы Робертса устанавливались, главным образом, на катерах, яхтах и других мелких судах.

Приведем некоторые данные об одном из таких котлов, установленном на яхте «El Primero».

---

[1] К. Буслей. Судовые водотрубные котлы. Перев. Д. Голова. Стр. 190—192. СПБ, 1898.

Поверхность нагрева котла — 105 $м^2$. Площадь колосниковой решетки — 3,3 $м^2$. Вес котла с водой, но без дымовой трубы, — 6 *т*. Котел занимал площадь 2,15 × 2,45 $м^2$. Давление в котле равнялось 14,5 *ат*. Котел давал пар паровой машине мощностью в 236 *и. л. с.*

Отношение мощности, развиваемой котлом, к его весу составляло около 40 *и. л. с./т*, т. е. приблизительно в два раза больше, чем у котлов Бельвиля.

Преимуществами котлов Робертса можно считать:

1) возможность легкой замены любой трубки котла;

2) экранирование боковых стенок топки;

3) возможность свободного теплового расширения всех частей котла.

Котел Робертса имел и ряд недостатков. Основные из них:

1. Слабая циркуляция воды, так как в котле не были устранены основные причины недостаточной циркуляции воды, свойственные и котлам Бельвиля и Геррешофа. Кроме того, Робертс уменьшил диаметр кипятильных трубок до 37 *мм* против 50 *мм* у котлов Геррешофа.

2. Невозможность производить внутреннюю очистку труб, чем котлы Робертса невыгодно отличались, например, от бельвилевских котлов.

Большого распространения котлы Робертса не получили.

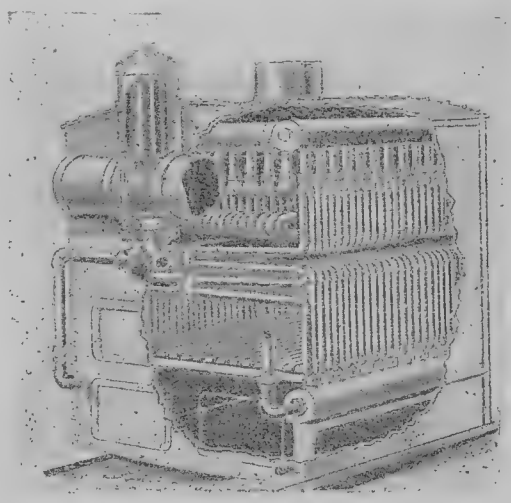


Рис. 105. Двойной котел Альми.

85. Котлы Альми

На рис. 105 показан котел Альми [1], поставленный в 1894 г. на американской миноноске «Stilleto» взамен котла Геррешофа. Каждая половина котла состояла из П-образного экранного коллектора и большого числа трубок, соединяющих экранный и паровой коллекторы. Экранный коллектор был расположен в зольной камере. Перемычка экранного коллектора лежала у задней стенки котла, и, наоборот, паровой коллектор был обращен перемычкой к фронту котла. По боковым стенкам от экранного коллектора шли два ряда труб, образующих собой боковые экраны. Верхние концы их соединялись с двумя рядами U-образных труб, которые своими другими концами присоединялись к двум рядам вертикально стоящих патрубков.

Последние входили через вилкообразные муфты в паровые коллекторы. От перемычки экранного коллектора топки шли два ряда вертикальных труб, составляющих задний экран. У задней стенки эти трубы соединялись с двумя рядами продольных труб. Последние входили передними концами через специальные коробки в перемычку парового коллектора. Для облегчения передвижения паровых пузырьков в паровой коллектор все трубки имели небольшой подъем кверху.

---

[1] Hutton W. S. Steam boiler construction. London. 1898. Нем. патент № 58729, 1890 г. Англ. патенты № 12630, 1890 г., № 15631, 1891 г.

Паровые коллекторы обеих половин котла соединялись общим вертикальным сепаратором, расположенным перед фронтом котла вне кожуха. Сепаратор представлял собой одно целое с двумя горизонтальными цилиндрами большого диаметра. От сепаратора к экранным коллекторам шли две вилкообразные циркуляционные трубы. Поверхность нагрева котла составляла 95 $м^2$. Площадь колосниковой решетки равна 2,75 $м^2$.

Вес котла с приборами, но без дымовой трубы, составлял 0,6 *т*. Вес котла с водой, отнесенный к 1 $м^2$ поверхности нагрева, составлял около 80 $кг/м^2$.

Более полные характеристики котлов Альми дает табл. 36.

Таблица 36

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины	
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	44	44
2	Площадь колосниковой решетки	R	„	1,06	1,06
3	Топливо	—	—	к. у.	к. у.
4	Давление в зольнике	$\Delta S_з$	*мм* вод. ст.	28	8
5	Сожжено топлива за час	B	*кг/ч*	185	72
6	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	175	68
7	Испарено воды за час ($\Delta i = 540$ *кал/кг*)	D	*кг/ч*	1 850	805
8	Получено стандартного пара ($\Delta i = 640$ *кал/кг*)	$D_с$	„	1 560	680
9	Паронапряжение пов. нагр. котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	42,2	18,3
10	Стандартное паронапряжение	$\frac{D_с}{H_к}$	„	35,6	15,5
11	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	10	11,2

Главные преимущества котлов Альми заключались в следующем:

1) возможность свободного теплового расширения отдельных элементов котла;

2) полное экранирование топки позволяло значительно повысить паропроизводительность котла, увеличивало срок службы топочной кладки и уменьшало ее вес.

Но одновременно в экранированных котлах появились и новые недостатки. Главный из них — возможность пережога экранных труб.

В то время контроль за питательной водой не всегда стоял на должной высоте. Постоянно была опасность покрытия накипью экранных трубок, работающих в весьма тяжелых термических условиях, что вызывало частый пережог их. В связи с этим к концу XIX в. экранирования топок почти не производилось, и к нему возвратились лишь несколько лет тому назад, когда выросшие технические средства помогли преодолеть упомянутый недостаток.

Котел Альми имел и другие очень важные недостатки:

1) невозможность внутренней очистки труб;

2) наличие большого количества соединений труб на резьбе, подвергающихся действию пламени.

Экранированные котлы Альми хотя и представляли интересную конструкцию судовых котлов для того времени, но большого распространения во флоте получить не могли.

Почти все котлы рассматриваемой группы, кроме котлов Бельвиля, получили весьма ограниченное применение на судах, но тем не менее они оставили после себя весьма ценный вклад для дальнейшего развития судового котлостроения, как-то:

1. Экранирование топок.
2. Возможность организовать стандартное производство отдельных элементов котла.
3. Легкость разборки котла.
4. Прямолинейность труб.

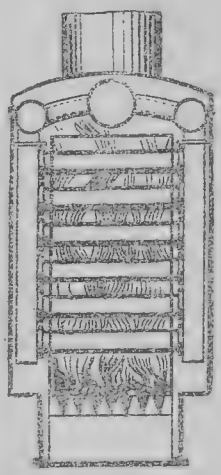


Рис. 106. Котел Griffith 1823 г.

КАМЕРНЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ

Основными недостатками котлов группы Бельвиля являлось:

1) образование в них очень влажного водяного пара,

2) вскипание воды,

3) резкие и частые колебания уровня воды и давления пара в котле,

4) очень слабая циркуляция воды.

Первые три недостатка объяснялись небольшим водяным и паровым пространством рассматриваемой выше группы котлов.

В связи с этим, наряду с работой по усовершенствованию котлов Бельвиля, велась разработка новой группы так называемых камерных водотрубных котлов. При конструировании и постройке данной группы котлов большое внимание уделялось возможности спокойного парообразования и улучшения циркуляции.

В камерных котлах, как мы увидим дальше, эта задача была разрешена удовлетворительно, но зато появились новые недостатки, из которых наиболее ощутимой была невозможность свободного теплового расширения кипятильных трубок, что ограничивало паропроизводительность котлов. Это заставляло конструкторов бороться за увеличение эластичности последних. На всех описанных ниже конструкциях будет показано, как изобретательская мысль стремилась улучшить циркуляцию воды в котлах при одновременном сохранении такой же эластичности, как у котлов Бельвиля.

Первым изобретателем камерных котлов принято считать Griffith. В 1823 г. Griffith был взят патент на двухкамерный котел, показанный на рис. 106.

86. Котлы Альбана (Германия)

Первый котел Альбана[1] был построен в 1843 г. (рис. 107). Котел состоял из 2 коллекторов, одной водяной камеры и кипятильных трубок. Альбан достиг больших успехов в усовершенствовании тех-

[1] VDI. Стр. 1112, 1896; E. Alban. Die Hochdruckdampfmaschine. Стр. 214, Rostock, 1843.

нологического процесса производства котлов еще в 1830 г. Он ввел сверление и зачистку дыр под заклепки. Кипятильные трубки для котла Альбана спаивались крепким припоем из медных листов толщиной в 2 *мм*. Позднее Альбан стал применять английские чугунные трубки.

Циркуляция воды в котле происходила так: в трубной доске против каждой кипятильной трубки делались два овальных отверстия; в нижнее отверстие могла входить вода, а из верхнего отверстия выходила пароводяная смесь. Кипятильные трубки крепились к трубной доске посредством болтов, головки которых опирались на приклепанные к трубкам заплечики (рис. 108).

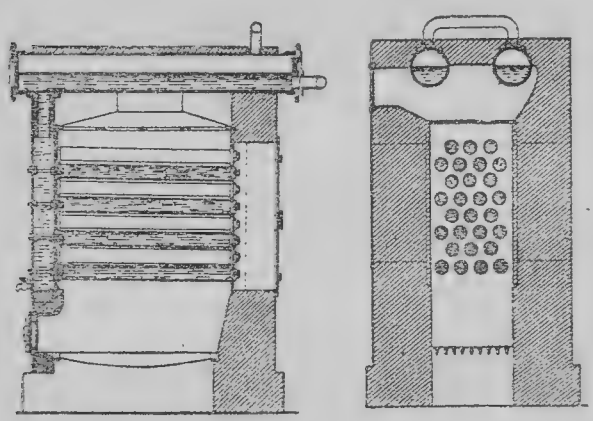


Рис. 107. Котел Альбана 1843 г

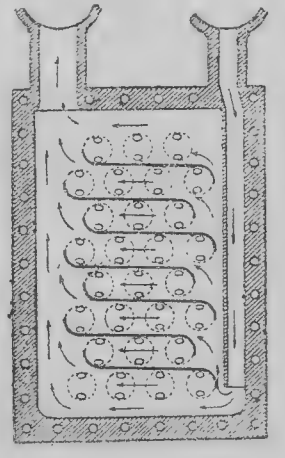


Рис. 109. Водяная камера котла Альбана.

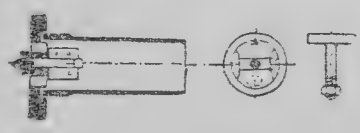


Рис. 108. Закрепление трубок в трубной доске.

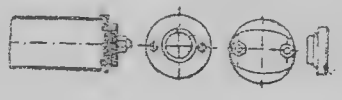


Рис. 110. Задний конец трубки котла Альбана.

Устройство водяной камеры ясно видно из рис. 109. Водяная камера показана здесь без крышки. Питательная вода, поступающая в заднюю часть правого коллектора, спускалась в низ водяной камеры по особому каналу. Отсюда вода могла итти по специальным направляющим каналам в кипятильные трубки. Образовавшаяся в кипятильных трубках пароводяная смесь направлялась по тем же каналам в левый коллектор. Задние концы кипятильных трубок были закрыты специальными крышками (рис. 110), через которые можно было производить очистку труб.

Преимуществом однокамерных котлов Альбана являлось свободное удлинение кипятильных трубок, которое не вызывало вредных напряжений.

Но циркуляция в котле Альбана была настолько плохой, что несколько лет спустя он отказался от описываемого котла и построил двухкамерный водотрубный котел, в конструкции которого была значительно улучшена циркуляция воды.

87. Котлы Гейне (Германия)

Развитие военного флота Германии относится к началу 40-х гг. XIX в. Война с Данией (1848 г.)[1] наглядно показала Германии всю важность военного флота для защиты своих берегов.

С 1864 г. германский флот уже успешно конкурирует с датским флотом, но все же до франко-прусской войны он не имеет большого политического значения.

Победа Германии над Францией во франко-прусской войне 1870—1871 гг. подняла ее политическое значение и вместе с тем принесла ей 5 млрд. франков. С этого времени собственное судостроение в Германии получает весьма высокие темпы развития.

Достаточно для наглядности привести следующую небольшую таблицу. Число военных судов в Германии по годам:

1848 г.	1870 г.	1880 г.	1890 г.
5	19	53	195

Наряду с усиленной загрузкой своих заводов, для ускорения броненосного судостроения, Германия еще принуждена была заказывать военные суда за границей. В 1879 г. для Германии были построены два последних броненосца в Англии.

С этого времени Германия переходит исключительно на отечественное судостроение и, мало того, начинает еще выпускать суда и для других стран. Между тем потребность Германии в военном флоте все растет. Захват колоний в Океании с 590 морских миль береговой линии, которую нужно охранять, в Африке 1660 морских миль береговой линии, наконец, частые войны в Южной Америке, где торговые интересы Германии были весьма существенны, — все это заставляет ее строить и содержать большой военный флот, для чего необходимо было иметь мощную техническую базу. В начале 70-х гг. германские судостроительные сталелитейные заводы не были готовы для выполнения колоссального заказа морского министерства, но они сумели настолько быстро перестроиться, что выполнили этот заказ, и в прокатке листового железа Германия очень быстро сравнялась с передовой страной — Англией.

В постройке судовых машин и котлов Англия была учителем Германии. Первые машины и котлы для военных судов были построены в Англии. Но с 1879 г. Германия переходит на самостоятельное котлостроение. Берется курс на уменьшение веса судов за счет понижения веса машин и котлов и перевода их на работу паром высокого давления. Особенно поощрялось введение во флоте водотрубных котлов отечественных изобретателей, как-то: Гейне, Дюрра и Шульца.

Германия быстро вышла из отсталых в передовые страны по военному флоту, но она не успокаивалась на своих успехах. В тронной речи в ноябре 1897 г. германский император сказал о военном флоте[2]:

«Развитие нашего военного флота не соответствует тем требованиям, которые Германия в праве предъявить к своим морским боевым силам. Они недостаточно сильны, чтобы в случае войны воспротивиться блокаде наших берегов и неприятельским действиям против них: они не росли с той быстротой, как развивались наши интересы, связанные с морской торговлей».

---

[1] Военные флоты и морская справочная книга на 1891 г. Стр. 219, С.-Петербург, 1891.

[2] Военные флоты и морская справочная книга. Стр. 448—449, 1904 г.

Отсюда становится понятным то широкое покровительство, которое оказывало германское правительство своим изобретателям. Даже такие несовершенные конструкции, как нижеописываемые котлы Гейне, имели применение в германском военном флоте.

Рассмотрим котел, построенный Гейне в 1890 г. для буксирного парохода «Fohn» (рис. 111) [1].

Отличительной особенностью котлов Гейне были пустотелые болтовые связи камер, через которые вводились трубчатые золосдуватели для наружной очистки кипятильных труб паром. Внутренняя очистка труб производилась через горловины водяных камер. Для

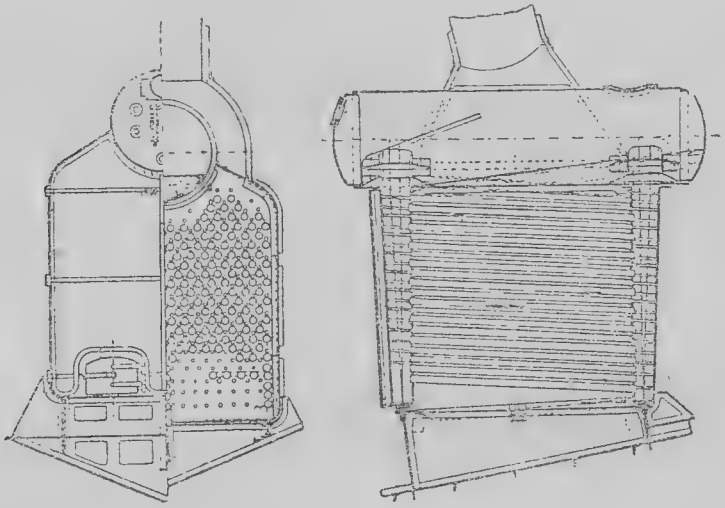


Рис. 111. Котел Гейне 1890 г.

лучшей сепарации пара над водяными камерами были устроены перегородки.

Питательная вода, направляющаяся в коллектор, опускалась в заднюю камеру и поступала в кипятильные трубы. Здесь часть воды испарялась. Пароводяная смесь, образовавшаяся в кипятильных трубках, входила через переднюю водяную камеру в коллектор.

Чтобы по возможности сохранить постоянными скорости воды и пара, стенки камер делались расходящимися кверху.

Рассматриваемый котел имел две топки, целиком экранированные (рис. 111). Топки разделялись трубчатыми перегородками на две камеры.

Важнейшие характеристики этого котла даны в табл. 37.

Приведенные данные показывают, что котел работал с небольшой нагрузкой. Повышение паропроизводительности котла ограничивалось невозможностью свободного теплового расширения трубок.

В результате термических напряжений труб при форсированной работе котла часто появлялись течи в местах соединения кипятильных труб с камерами и в заклепочных швах самих камер с коллекторами.

Котлы Гейне широкого применения не получили.

---

[1] Немецкий патент № 751, № 93602, 1877 г. VDI. Стр. 1113, 1896.

88. Котлы Ориоля (Франция)

Котлы Ориоля[1] постройки 1890 г. по внешнему виду напоминали собой котлы Гейне (рис. 112). Отличались они от последних лишь тем, что стенки камеры у них шли параллельно, в то время как у котлов Гейне они расходились кверху.

Паровой коллектор у котлов Ориоля делался один на два котла. Коллектор был расположен вне обмуровки между котлами, стоящими друг против друга.

Вода поступала в паросушитель, а из него шла по трубе в заднюю камеру. Паровой коллектор соединялся с задней и передней камерами общей паровой трубой. Она служила для отвода пара, скопляющегося

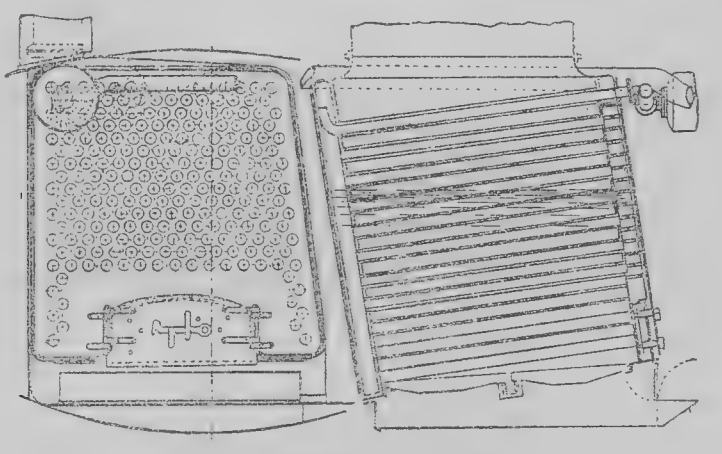


Рис. 112. Котел Ориоля 1890 г.

в камерах. Для производства внутренней очистки котла водяные камеры имели горловины.

Котел имел одну целиком экранированную топку. Невыгодной особенностью котла Ориоля являлось очень небольшое водяное пространство в нем. Водой заполнялась только нижняя часть труб. В связи с этим, даже при небольшом несоответствии количества выделяемого тепла и поступающей в котел воды, резко изменялось соотношение водяного и парового пространства. Это в свою очередь вызывало сильные колебания давления пара. Последние были значительно больше, чем у котлов Бельвиля, так как у котла Ориоля отсутствовали автоматы питания. Из-за плохой циркуляции данные котлы не допускали большой форсировки.

Для сравнительной оценки работы котла Ориоля заводом Шихау были проведены параллельные испытания двух шотландских котлов и котла Ориоля, установленных на двух однотипных пароходах «Elbing I» и «Elbing II» с почти одинаковыми скоростями (табл. 38).

Приведенная ниже таблица результатов испытания показывает, что паропроизводительность 1 $м^2$ поверхности нагрева котла Ориоля составляла примерно 13,8 *кг* пара в час против 18 *кг* пара, снимаемого в час с 1 $м^2$ поверхности нагрева шотландских котлов.

---

[1] VDI. Стр. 1115. 1896. Transactions of the institution of naval architects. Стр. 93, London, 1894 г. Англ. пат. № 9121, 1887 г.

Таблица 37

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Конструктивные и опытные данные
1	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	10
2	Площадь колосниковой решетки	R	$м^2$	2,5
3	Поверхность нагрева котла	$H_к$	„	96,5
4	Диаметр трубок	$d_н/d_{вн}$	*мм/мм*	65/59,5
5	Вес котла без воды	$G_к$	*кг*	8 544
6	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	„	11 134
7	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	7,9
8	Часовой расход угля	B	*кг/ч*	292
9	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	117
10	Мощность машины	N_i	*и. л. с.*	234
11	Испарено воды в час	D	*кг/ч*	1 880
12	Паронапряжение решетки	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	19,5
13	Вес котла на 1 *т* пара	$\frac{G_к}{D}$	*т/т*	4,5
14	Вес котла с водой на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	„	5,9
15	Вес котла без воды на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_к}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	37,5
16	Вес котла с водой на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	42,8
17	Вес котла без воды на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_к}{H_к}$	$кг/м^2$	88,5
18	Вес котла с водой на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	„	116
19	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	6,7
20	Ориентировочный к.п.д. котла	$\eta_к$	%	46

Небольшая удельная паропроизводительность объясняется, главным образом, плохой циркуляцией воды в котле.

Приведенные здесь отношения индикаторной мощности на 1 *т* веса котла показывают, что котлы Ориоля давали примерно такие же значения, как и котлы Гейне.

Таблица 38

№ по пор.	Наименование	„Elbing I“ (2 ш. к.)	„Elbing II“ (Ориоля)
1	Полная площадь колосниковой решетки в $м^2$ . .	2,23	4,83
2	Поверхность нагрева котла $м^2$	116	161,9
3	Вес котла с водой в *т*	21,0	14,36
4	Вес воды в *т*	9,4	4,8
5	Средн. индикат. мощность машин в *и. л. с.* . . .	260	280
	То же на 1 *т* веса котлов	12,38	19,42
6	Средний расход угля на 1 *и. л. с. ч* в *кг/л. с. ч.* .	0,88	1,0

Невыгодной особенностью котла Ориоля является увеличение удельного расхода угля на 1 *и. л. с. ч* примерно на 20%. В связи с этим, котел Ориоля был заменен на вышеупомянутом пароходе шотландским котлом.

89. Котлы Лаграфеля д'Аллеста 1887 г. (Франция)

В 90-х гг. XIX в. лучшие результаты в эксплоатации, по сравнению с ранее рассмотренными камерными котлами, показали котлы Лаграфеля д'Аллеста[1], получившие широкое распространение в военном флоте.

Так, например, на броненосцах и крейсерах французского военного флота было установлено 244 котла Лаграфеля д'Аллеста, обслуживающие паровые машины каждого корабля мощностью от 5000 до 15 000 *и. л. с.* Упомянутые корабли развивали скорость от 17 до 22 узлов. На рис. 113 и 113а показан котел Лаграфеля д'Аллеста, построенный в 1893 г. для «Chasseloup-Laubat».

Он состоял из парового коллектора, двух водяных камер, жестко соединяющихся с ним, и пучка кипятильных трубок, расположенных не в шахматном порядке, а в затылок.

Циркуляция воды в рассматриваемом котле схематически может быть представлена так (рис. 113b). Вода под действием теплоты сгораемого топлива превращалась в пар. Пузырьки пара поднимались вверх, увлекая за собой и частицы воды. Пар, войдя в паровой коллектор, уходил к потребителю, а увлеченная с паром вода направлялась вдоль коллектора к задней водяной камере, где она распределялась по кипятильным трубкам и снова частично превращалась в пар. Такое круговое движение одного и того же количества воды в котле происходило до тех пор, пока выделенная часть воды целиком не испарялась.

Число законченных циклов движения выделенного объема воды называется кратностью циркуляции.

---

[1] VDI. Стр. 1115—1118, 1896. Англ. патент № 3121, 1887 г. Journal of the American Society of naval engineers. Стр. 386, 1895. Нем. пат. № 39182, 1886 г.; № 35499, 1885 г.; № 41158, 1887 г. Англ. пат. № 11160, 1888 г. и № 16956, 1896 г. TINA. Стр. 91—93, 1894.

Если, из-за небольшой разницы температуры газов и воды в котле, в верхних трубках котла образовывалось незначительное количество паровых пузырьков, тогда по верхним трубкам было возможно опускание воды в заднюю камеру, хотя навстречу ей двигалось небольшое количество паровых пузырьков. Количество спускающейся по этим трубкам воды будет тем больше, чем меньше в них образуется пузырьков пара, так как последние будут тормозить движение воды, идя ей навстречу.

Следовательно, в заднюю камеру вода может попадать не только из парового коллектора, но и из передней камеры по верхним кипятильным трубкам (рис. 113b). Здесь будет как бы два циркуляционных кольца: первое — нижние кипятильные трубки, передняя водяная

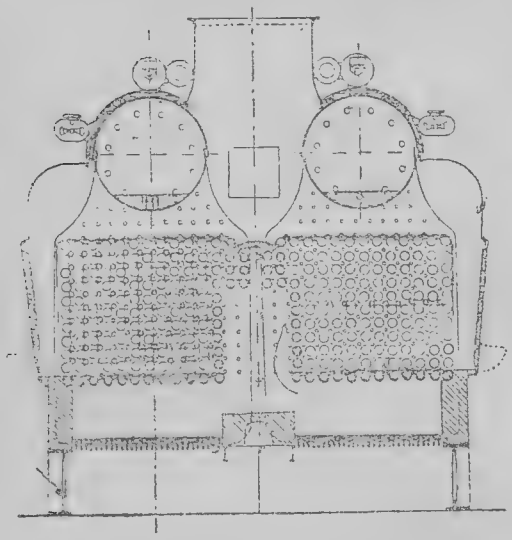


Рис. 113. Котел Лаграфеля д'Аллеста.

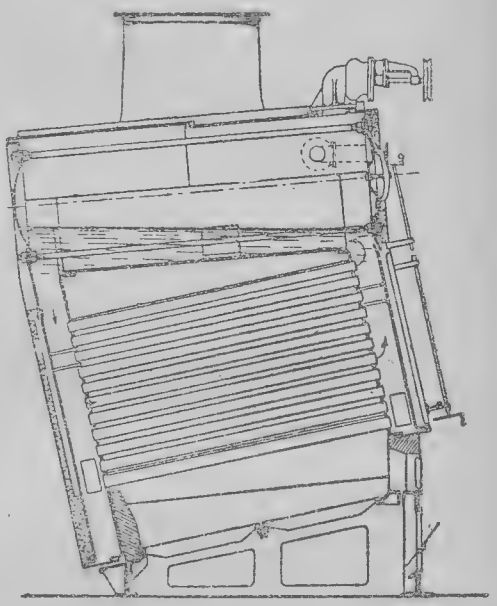


Рис. 113а. Котел Лаграфеля д'Аллеста.

камера, паровой коллектор, затем задняя водяная камера и снова нижние трубки; второе — нижние трубки, передняя камера, верхние кипятильные трубки, задняя камера и снова нижние трубки.

Котлы попарно соединялись в один кожух (рис. 113). Верхний и нижний ряды труб были перекрыты огнеупорными щитками. Дымовые газы из обеих топок направлялись в среднюю камеру между конвекционными пучками труб обоих котлов, а отсюда они расходились в стороны. Выйдя из газохода у боковых стенок сдвоенного котла, газы опять направлялись в общий дымоход, расположенный между паровыми коллекторами.

Для лучшего использования поверхности нагрева, т. е. для уменьшения мертвых углов, крайние боковые ряды труб в верхней части более чем на половину перекрыты щитами.

Кипятильные трубки часто делались неодинакового диаметра по длине, а именно диаметр трубки увеличивался с увеличением объема пароводяной смеси, образовавшейся в ней.

Таблица 39

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	„Jauregibery" № опытов 1	„Jauregibery" № опытов 2	„Jauregibery" № опытов 3	„Jauregibery" № опытов 4	Броненосец „Massena" № опытов 1	Броненосец „Massena" № опытов 2	Броненосец „Massena" № опытов 3	„D'Iberville" № опытов 1	„D'Iberville" № опытов 2	„D'Iberville" № опытов 3	Sanite Barbe
	Год испытания			Февраль 1897 г.				1896 г.			VI и VII 1893 г.			23/V 1899 г.
1	Продолжительность испытания	Z	час	6	24	6	6	4	6	24	6	18	4,25	2
2	Число работающих котлов	n		23	24	24	11	24	24	24	—	—	—	—
3	Суммарная пов. нагр. котла	$\sum H_к$	$м^2$	3 120	3 261	3 261	1 500	3 000	3 000	3 000	1 056	1 056	1 056	95
4	Суммарная площадь колосник. решетки	$\sum R$	$м^2$	95,5	100	95,5	45,5	100	100	100	31,2	31,2	31,2	2,22
5	Мощность котлов	N_i	*и. л. с.*	13 189	10 511	8 076	3 433	14 200	13 960	9 650	1 800	3 313	5 060	—
6	Паропроизвод. котла	D	*т/ч*	105	84	70	27,4	113,5	112	77,2	14,4	26,5	40,5	4,518
7	Паронапряжение пов. нагр. котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	33,7	25,7	21,4	18	38	37,3	33,4	13,6	25	38,4	47,5
8	Сожжено угля за час	B	*кг/ч*	10 550	7 350	5 480	2 370	12 000	12 300	7 350	1 160	2 780	1 950	520
9	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	110,8	73,2	57,5	52	120	123	73,5	37	85	105	223
10	Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и.л.с.ч*	0,8	0,7	0,68	0,69	0,85	0,88	0,75	0,647	0,838	0,98	—
11	Средняя видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	10	11,4	12,7	11,5	9,45	9,1	10,5	12,4	9,6	8,2	8,7
12	Ориентировочный к. п. д. котла	η	%	69	79	88	79	65	61	72	85	66	56	—
13	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12 224
14	„ „ „ на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/т*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 680
15	„ „ „ на 1 $м^2$ поверхности нагрева котла	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	129

По данным этой таблицы, котлы Лаграфеля д'Аллеста работали вполне экономично. См. Военные флоты и морская справочная книга. Стр. 528, 536, 601, 1899.

Для устранения возможного прогибания труб от термических напряжений нижние ряды их снабжались продольными ребрами (трубки Серва).

Внутренняя очистка труб от накипи, кроме нижнего ряда, могла производиться через специальные горловины, закрываемые во время работы котла крышками (рис. 114). Крышки ставились на смачиваемое в олифе асбестовое кольцо толщиной приблизительно в 1,5 *мм*.

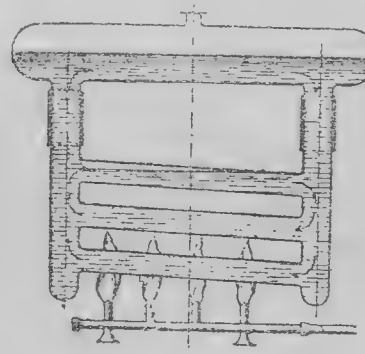


Рис. 113b. Схема циркуляции воды в котле Лаграфеля д'Аллеста.

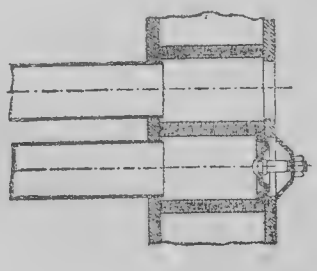


Рис. 114. Часть водяной камеры котла Лаграфеля д'Аллеста.

Отметим, что эти котлы не снабжались автоматическими регуляторами питания. Необходимость постановки регуляторов питания здесь была гораздо меньше, чем у котлов Бельвиля. Это объясняется тем, что отношение веса воды в котле к весу котла у котлов Лаграфеля д'Аллеста в 3 раза больше, чем у бельвилевских котлов.

Основные характеристики котла приведены в табл. 39.

Котлы Лаграфеля д'Аллеста в начале своего появления получили широкое распространение в военном флоте (табл. 40).

Таблица 40

Число котлов Лаграфеля д'Аллеста, установленных и строившихся для военного флота до 1900 г. вкл.

№ по пор.	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	Франция	14	274	165 000
2	Бразилия	2	16	7 000
		16	290	172 000

Распространение котлов Лаграфеля д'Аллеста продолжалось до тех пор, пока военный флот, в силу тактических соображений, не выдвинул перед вновь строящимися котлами требования значительного повышения удельной паропроизводительности.

Котлы Лаграфеля д'Аллеста не могли удовлетворить этим требованиям, так как они, как и другие двухкамерные котлы, имели очень

ограниченную эластичность. Это вызывало частые появления течи в местах крепления кипятильных трубок в водяных камерах. Поэтому котлы Лаграфеля начали постепенно вытесняться котлами более совершенных конструкций.

90. Котлы Штейнмюллера (Германия)

Чтобы избежать аварий из-за гидравлических ударов в паропроводе и машинах при эксплоатации судовых паросиловых установок, Штейнмюллер[1] при разработке своего котла обратил основное внимание на получение более сухого пара.

Показанный на рис. 115 котел был построен в 1870 г. заводом Штейнмюллер в Гуммерсбахе для буксирного парохода «Torgau». Котел состоял из двух камер, парового коллектора и кипятильных труб. Трубки котла были расположены в шахматном порядке.

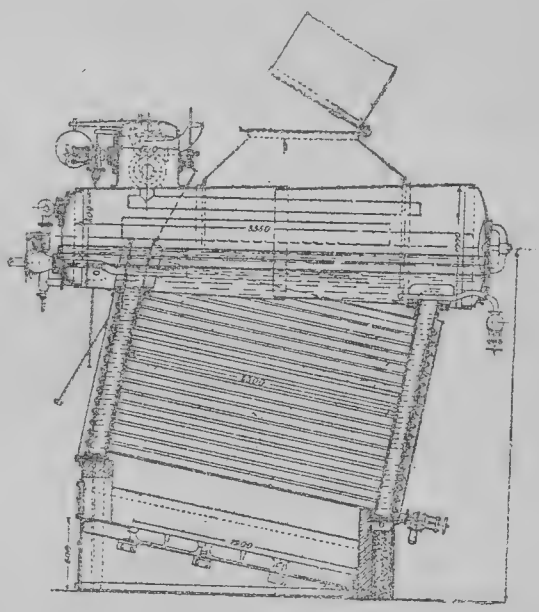


Рис. 115. Котел Штейнмюллера 1870 г.

Процесс парообразования в данном котле схематически может быть представлен так.

Поступающая в коллектор питательная вода спускалась в заднюю водяную камеру, а оттуда входила в кипятильные трубки.

Пароводяная смесь, образовавшаяся в трубках, поднималась по передней камере в специальный открытый сзади канал со щелевидными отверстиями на дне. Там пар должен был значительно осушиться.

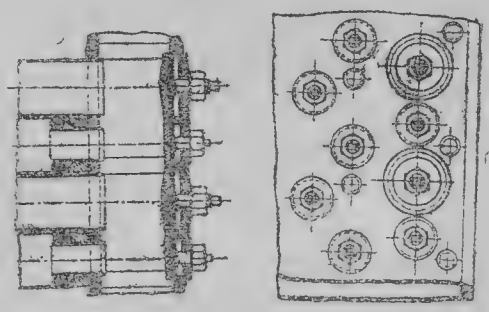


Рис. 116. Боковой ряд трубок в котле Штейнмюллера.

Из паросушителя пар поступал в паровой колпак, установленный в верхней части коллектора, а вода снова опускалась в заднюю водяную камеру. Вода в данном котле могла поступать из передней камеры в заднюю по верхним трубкам. По мнению конструктора, такое устройство должно было обеспечить получение почти сухого пара.

Развальцовка и очистка кипятильных труб производилась через горловины (рис. 116), а наружная очистка труб выполнялась паровым банником (золосдуватель) (рис. 116а).

[1] VDI. Стр. 1118—1120, 1896. Англ. пат. № 11105, 1884 г. Нем. патент № 39182, 1886 г.

Путь газов в котле показан на рис. 117 стрелками. Замечательной особенностью данного котла является защита боковых стенок от действия высоких температур газов кипятильными трубками, поставленными плотно одна к другой. Это позволило уменьшить потери тепла в окружающую среду стенками кожуха. Трубки имели температуру, близкую к температуре кипения. Однако, данное преимущество принесло с собой новый недостаток: трубки покрывались золой и сажей, в которых часто присутствовала сера, способствовавшая при увлажнении золы сильному разъеданию трубок.

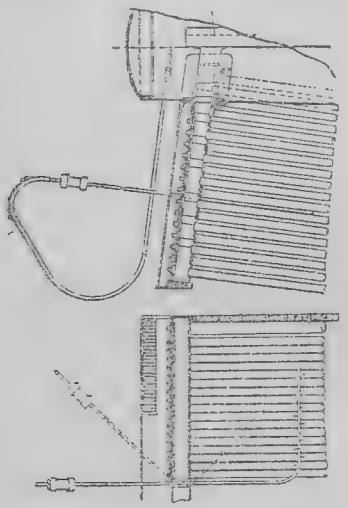


Рис. 116а. Приспособление для банения трубок в котле Штейнмюллера.

Как видно из рис. 116, половина кипятильных труб, защищающих кожух от действия высоких температур, имела переходные приваренные патрубки, позволяющие производить вальцовку этих труб в камере. Промежутки в местах постановки патрубков закрывались чугунными кольцами.

Приведем несколько основных характеристик котла Штейнмюллера.

Давление котла	12,0 *ати.*
Поверхность нагрева котла . . .	145 *м*².
Площадь колосниковой решетки	4,83 *м*².
Вес котла	17,5 *т.*
Вес воды	5 *т.*

Результаты испытаний котла, проведенных его строителями, показали, что с 1 *м*² поверхности нагрева относительно легко можно было

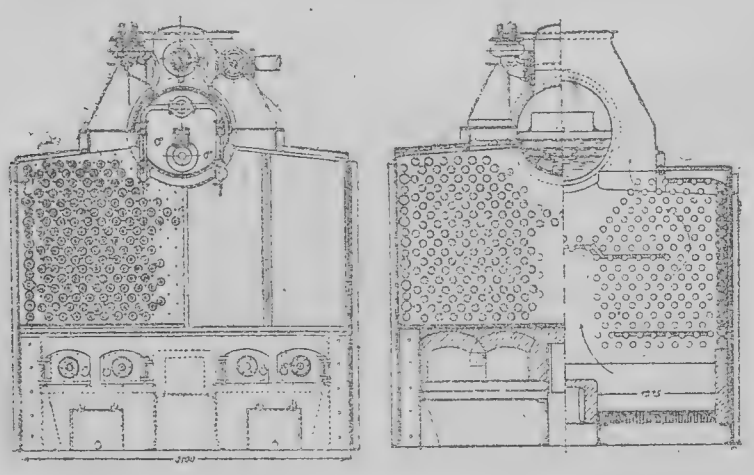


Рис. 117. Котел Штейнмюллера 1870 г.

снимать в час 37 *кг* пара, при этом на 1 *м*² колосниковой решетки сжигалось в час около 176 *кг* стандартного угля.

Котел Штейнмюллера имел примерно такие же характеристики, как и котел Лаграфеля д'Аллеста.

91. Котлы Ярроу (Англия)

В 1890 г. завод Ярроу [1] изготовил несколько камерных котлов для английских миноносцев. По конструкции эти котлы были сходны

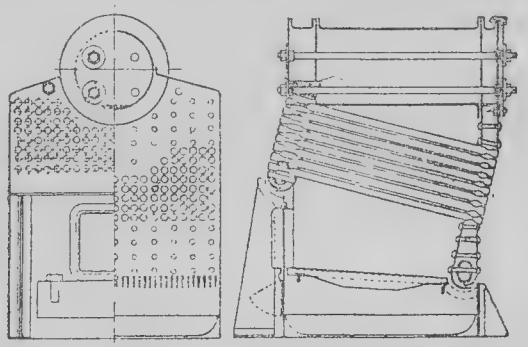


Рис. 118. Камерный котел Ярроу 1890 г.

с котлами Гейне и Ориоля (рис. 118). Отличались они от последних только отсутствием болтовых связей в водяных камерах. Для избежания раздувания камер последние связывались кипятильными трубками, ввальцованными в стенках камер (рис. 119).

Рис. 119. Трубка котла Ярроу.

Поступление воды в кипятильные трубки и выход из них пароводяной смеси осуществлялся через прорезы в трубках между стенками камеры. Наружные концы трубок закупоривались пробками.

Котлы Ярроу рассматриваемой конструкции успешного применения в военном флоте не получили.

КАТЕРНЫЕ КОТЛЫ

92. Огнетрубные катерные котлы

Процесс эксплоатации мощных кораблей выявил необходимость снабжения последних для самообслуживания паровыми катерами. В военном флоте катеры были минными и представляли собой боевую единицу, от которой требовалась максимальная скорость. Последняя достигалась как увеличением мощности установки, так и уменьшением веса катерных котлов. Все это привело к необходимости поставить жесткие требования к катерным паросиловым установкам в отношении максимального снижения их веса и габаритных размеров для заданной мощности. В этом отношении весьма большие успехи были достигнуты в постройке пролетных катерных паровых котлов [2]. На рис. 120 показан один из таких котлов постройки 1877 г.

Принципиально схема устройства котла почти ничем не отличается от ранее рассмотренных пролетных котлов, если не считать устройства вертикального сухопарника, под крышкой которого расположена паро-

[1] VDI. Стр. 1120. 1896; TINA. Стр. 301, 1899. Англ. патент № 18965, 1893 г.
[2] TINA. Стр. 317 — 334, 1887.

приемная труба. Благодаря такому устройству пар получался более сухим.

Характеристики данного котла приведены в табл. 41.

Таблица 41

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Котел	
				катерный пролетный	шотландский
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	27,85	98
2	Вес котла	G	$т$	1,5	12,7
3	Паропроизводительность котла	D	$кг/ч$	1360	2900
4	Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	47	27
5	Вес котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_к}{H_к}$	$кг/м^2$	54	13
6	Вес котла на 1 $т$ пара	$\frac{G}{D}$	$кг/т$	1100	4400
7	Объем, занимаемый котлом,	$V_к$	$м^3$	2	20,3
8	Объем котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{V_к}{H}$	$м^3/м^2$	0,0718	0,207
9	Объем котла на 1 $т$ пара	$\frac{V_к}{D}$	$м^3/т$	1,47	7,0

Основные данные этой таблицы указывают на большие преимущества пролетных котлов по сравнению с шотландскими.

На рис. 121 показан катерный котел Гольца, построенный в 1888 г. Он напоминает собой локомотивный котел и отличается от последнего лишь цилиндрической формой топки.

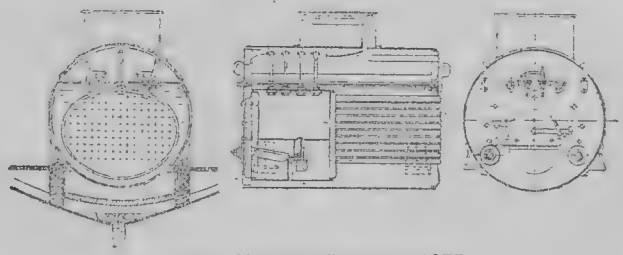


Рис. 120. Катерный котел 1877 г.

В данном котле обращает на себя внимание устройство отражательного сводика, для поддержания которого через топку пропущена специальная трубка, охлаждаемая изнутри котельной водой. Против концов трубки сделаны отверстия, закрываемые пробками. Отвернув пробку, можно производить осмотр, очистку и даже замену поврежденной трубки.

Характеристики настоящего котла примерно такие же, как и у выше рассмотренного. Разумеется, к данным котлам относятся все недостатки, присущие локомотивным и пролетным котлам, главным образом, частые появления течи в трубных решетках. В связи с этим, на-

Рис. 121. Котел Гольца 1888 г.

ряду с усовершенствованием катерных, локомотивных и пролетных котлов, производились небезуспешные попытки внедрения на катеры водотрубных котлов.

Ниже мы рассмотрим наиболее интересные типы катерных водотрубных котлов Гольца, Пенелля, Тоуна и др.

93. Котлы Гольца (Германия)

На рис. 122 показан котел Гольца, 1889 г., который строился на давление не выше 7 *ати*. Поверхность нагрева котла составляла всего 10,5 $м^2$, а площадь колосниковой решетки — 0,39 $м^2$. Котлы Гольца

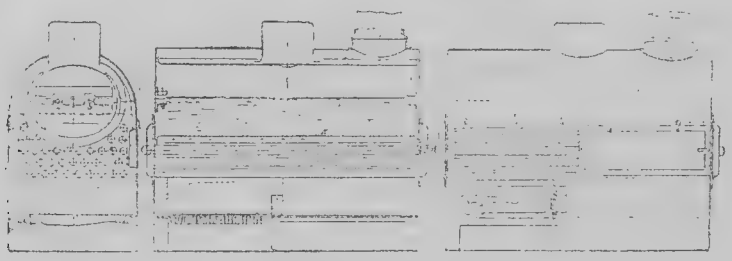


Рис. 122. Котел Гольца 1889 г.

строились в Гамбурге. Они предназначались, главным образом, для катеров и небольших пароходов [1].

Котел состоял из эллиптического парового коллектора и двух водяных камер, которые соединялись между собой кипятильными трубками, расположенными в шахматном порядке.

Дымовые тазы омывали не только трубки котла, но и паровой коллектор. Топочные дверцы были расположены не с фронта, а сбоку котла.

Наружная очистка труб могла производиться только после остановки работы котла через показанные на рис. 122, легко снимаемые специальные дверцы.

Примерно такую же конструкцию котла предложил Пенелль.

[1] VDI. Стр. 1143, 1896.

94. Котлы Пенелля (Франция)

В 1874 г. во французском флоте получили большое распространение котлы Пенелля [1]. От котлов Гольца они отличались тем, что имели еще два паросборника для лучшей осушки пара. Каждый паросборник соединялся с паровым коллектором только одним большим па-

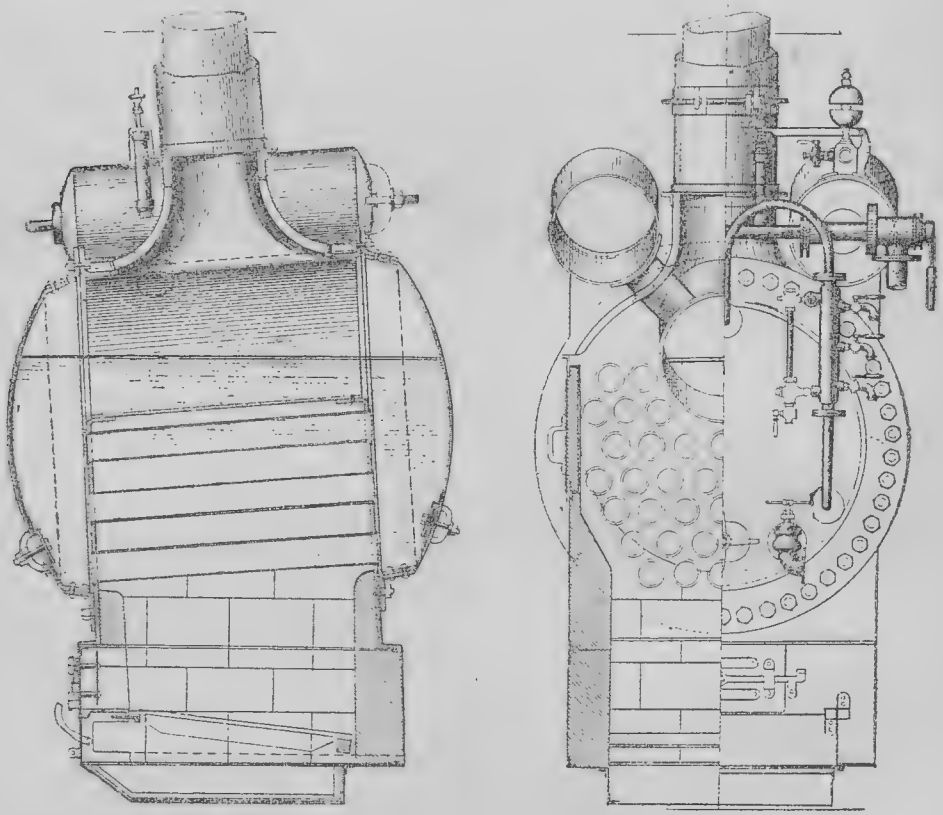


Рис. 123. Котел Пенелля 1874 г.

трубком. Отвод пара в машину из паросборников осуществлялся одной паровой трубой.

Для осмотра и внутренней очистки труб можно было снимать крышки водяных камер, поставленные на болтах. Циркуляция воды в этих котлах должна была быть относительно хорошей.

Поверхность нагрева котла Пенелля (рис. 123) была всего 5,3 м², а площадь колосниковой решетки составляла только 0,22 м². Вес котла со всей арматурой был равен 1,29 *т*, причем на воду приходилось примерно 0,12 *т*, т. е. 1/11 полного веса котла.

[1] VDI. Стр. 1144, 1896. Англ. пат. № 5064, 1890 г.
A. E. N. Bienaymé. Les machines marines. Стр. 152. Paris, 1887 г.

95. Котлы Тоуна (США)

Более совершенные катерные водотрубные котлы были предложены Тоуном[1]. На рис. 124 показан котел Тоуна, построенный в 1892 г. для американского миноносца. Как видно из рис. 124, топка котла Тоуна окружена с четырех сторон одной общей камерой и представляет собой целиком экранированную топку.

Боковые части камеры соединялись между собой кипятильными трубками, расположенными в затылок. Отдельные ряды трубок пере-

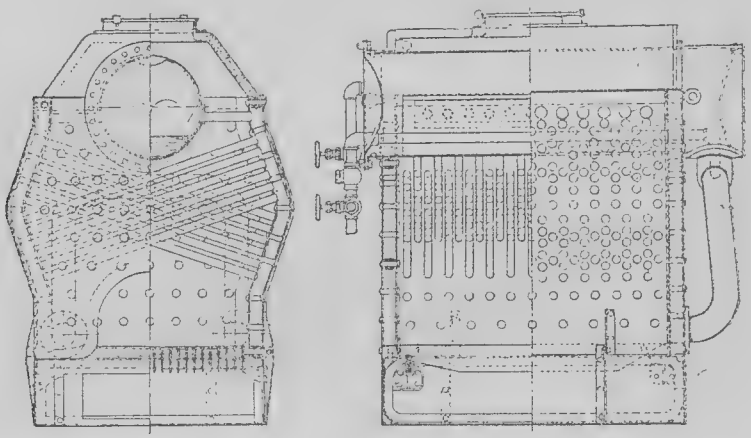


Рис. 124. Котел Тоуна.

крещивались между собой. Форма боковых частей камеры изогнута, что объясняется желанием конструктора осуществить развальцовку труб перпендикулярно к стенке камеры. С боков камера соединялась с коллектором рядами труб. Последние с одной стороны развальцовывались в трубной доске камеры, а с другой — в паровом коллекторе. Паровой коллектор в месте развальцовки труб был укреплен накладкой. Щиты в паровом коллекторе служили для осушения пара (рис. 124).

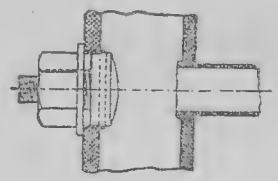


Рис. 125. Горловина и ее крышка в котле Тоуна.

Питательная вода подводилась в коллектор с фронта по трубе, проходящей через все водяное пространство. На этом пути она успевала подогреться настолько, что воздух, находящийся в ней, выделялся. Этим самым уменьшалась вероятность коррозии кипятильных трубок.

Питательная труба в коллекторе заканчивалась соплом, которое было предназначено для подсасывания воды из парового коллектора в две циркуляционные трубы. Они соединяли паровой коллектор с низом и задней частью водяной камеры.

Осмотр и внутренняя очистка труб производились через горловины, которые закрывались коническими крышками (рис. 125). Под крышку цилиндрического отверстия для большего уплотнения ставилась прокладка из медного кольца.

---

[1] VDI. Стр. 145. 1896.

В конце газохода был расположен подогреватель питательной воды (экономайзер) (рис. 126), состоящий из одной длинной трубы, составленной посредством угольников из нескольких труб.

Выгодной особенностью этого котла являлось полное отсутствие кирпичной кладки, которая была заменена здесь водяными камерами. Котел имел поверхность нагрева 14 $м^2$, а поверхность решетки 0,6 $м$.

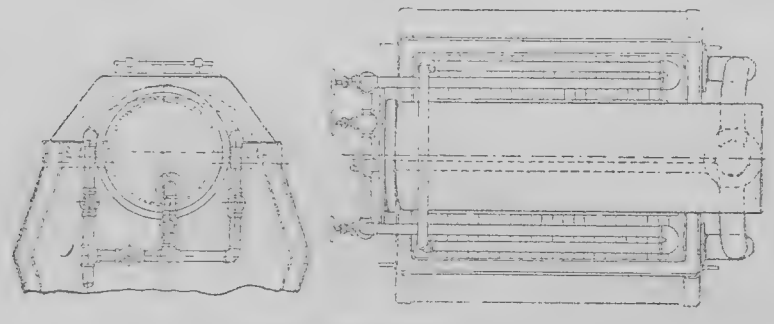


Рис. 126. Водяной экономайзер в котле Тоуна.

Давление пара в котле поддерживалось равным 10 *ати*. Кипятильные трубки имели диаметр 25/21 *мм*.

Котлы Тоуна применялись, главным образом, в американском флоте для паровых катеров, но они скоро были вытеснены водотрубными котлами Уорда.

96. Котлы де Диона, Бутона и Трепарду (Франция)

Весьма оригинальную конструкцию камерных водотрубных котлов предложили де Дион, Бутон и Трепарду[1]. Их котлы были установлены на нескольких французских миноносцах.

Таблица 42

№ по пор.	Наименование	Цифровые величины
1	Поверхность решетки	4,00 $м^2$
2	Вес котла с водой . . . . . около	15,5 $т$
3	Вес котла без воды	14,55 $т$
4	Часовой расход угля	1315 $кг$
5	Мощность, развиваемая машиной.	1133 *и. л. с.*
6	Весовое напряжение решетки	330 $кг/м^2$ *ч*
7	Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	1,16 *кг/и. л. с. ч*
8	Вес котла с водой, отнесенный к 1 *и. л. с.*	14,5 *кг/и. л. с.*
9	Вес котла без воды, отнесенный к 1 *и. л. с.*	12,8 *кг/и. л. с.*

[1] VDI. Стр. 643. A. de Dion, Th. Bouton u. Ch. Trepardoux Dampfkessel. 1887. Grard. Chaudières marines. Стр. 282—286, Paris, 1897.
Англ. пат. № 12331, 1888 г. Немецкий пат. № 27725, 1883 г.

Рассматриваемый котел (рис. 127) состоял из вертикально стоящего парового коллектора, от которого по радиусам расходились кипятильные трубки. Трубки наружными концами ввальцовывались в цилиндрическую щелевидную камеру. Снаружи камера была покрыта слоем изоляции.

При испытаниях миноносца, оборудованного данными котлами, были получены следующие результаты (табл. 42).

Данные этой таблицы указывают на достижение больших весовых напряжений и относительно невысокого $\frac{G}{N_i}$. Однако, эксплоатационные наблюдения показали непригодность котла де Диона, Бутона и Трепарду, главным образом, из-за частого появления течи в местах развальцовки труб. Кроме того, верхние трубы этого котла часто прогорали. Все это ограничивало повышение производительности котла, и поэтому котлы де Диона, Бутона и Трепарду не получили широкого распространения.

Несмотря на то, что все камерные котлы довольно скоро вышли из употребления на судах, многие из их преимуществ были использованы позже в судовом котлостроении в качестве основных принципов для разработки и проектирования котлов, а именно:

1. Легкая доступность внутренней и наружной очистки труб.
2. Расположение кипятильных трубок в шахматном порядке перпендикулярно к потоку газов.
3. Улучшение циркуляции воды в котле.

СЕКЦИОННЫЕ КОТЛЫ

Одним из основных недостатков камерных котлов была жесткость конструкции, обусловливаемая наличием весьма больших щелеобразных водяных камер. Котлы с такими камерами часто давали течь. Для уменьшения этого недостатка некоторые котлостроительные заводы начали выпускать котлы с водяными камерами малых размеров — секционные котлы. К числу таких конструкций можно отнести секционные котлы Ситона, В и W, Гейторна, Торникрофта—Маршалла и др.

97. Котлы Ситона (Англия)

Показанные на рис. 128 котлы Ситона[1] состояли из четырех двухкамерных водотрубных котлов. Последние соединялись между собой общим паросборником, расположенным перпендикулярно к паровым коллекторам. Эта замена двух камер восемью небольшими позволила конструктору освободиться от болтовых связей в камерах.

Передние камеры для уменьшения гидравлических сопротивлений были сделаны расширяющимися кверху в соответствии с увеличением объема поднимающейся по ним пароводяной смеси. Передние и задние камеры закрывались волнистыми крышками, выполненными из листовой стали. Отняв крышку, получали доступ сразу ко всем трубкам камеры. Все задние камеры котла сообщались с паровыми коллекторами посредством четырех вертикальных труб большого диаметра. Такое присоединение давало котлу некоторые преимущества по сравнению, например, с котлом Лаграфеля д'Аллеста, у которого камеры жестко и непосредственно соединялись с паровыми коллекторами. Благодаря такому соединению, эластичность котлов значительно улуч-

[1] VDI. Стр. 1143, 1896; TINA. Стр. 296—308, 1894. Англ. пат. № 19853, 1893 г.

шалась, так как перемещение задних камер, вызванное тепловым расширением труб, могло происходить относительно свободно без появления течи в котле. Это соединение было выгодно и тем, что давало возможность осаждения части посторонних примесей из котловой воды в отростках спускной трубы. Накопившаяся в этих отростках грязь периодически удалялась.

Для более полного обтекания поверхности нагрева между отдельными камерами были поставлены железные щиты (рис. 128). Последние охлаждались самими трубками.

Выгодными особенностями котлов Ситона можно считать:

1. Шахматное расположение кипятильных трубок.

2. Небольшой диаметр трубок.

Эти преимущества обусловили увеличение коэфициента теплопередачи и уменьшение веса и габаритных размеров пучка труб.

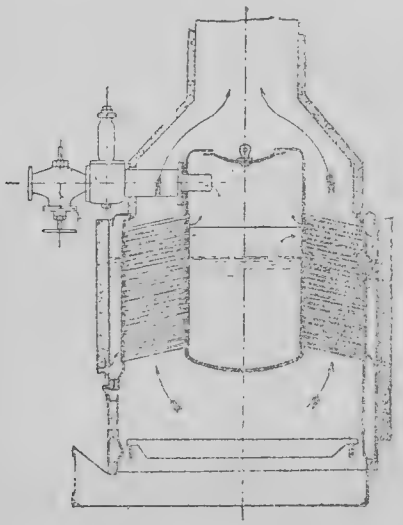


Рис. 127. Котел де Дион, Бутона и Трепарду.

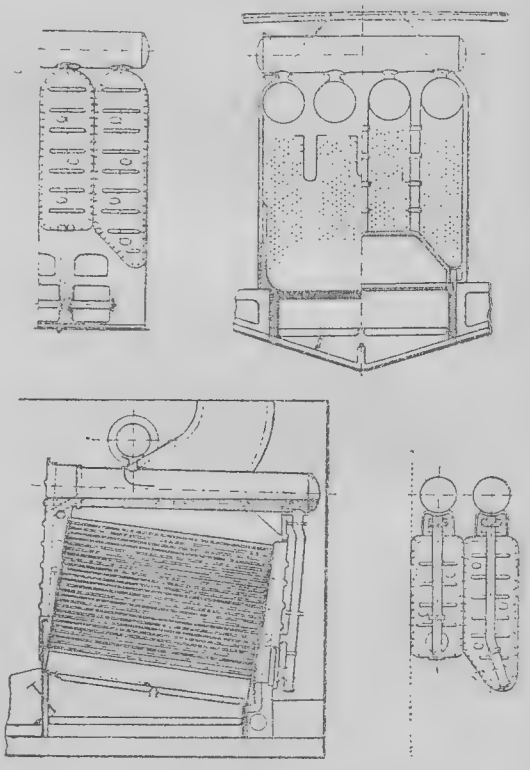


Рис. 128. Котел Ситона.

3. Улучшение условий для циркуляции воды в котле.

Движение воды и пара в водяных камерах коллектора и спускных трубах, имеющих сравнительно большое сечение, встречает малое сопротивление.

4. Свободный доступ к осмотру и очистке всех кипятильных трубок.

Упомянутые преимущества обусловили собой появление в котле и весьма крупных недостатков, как:

1. Жесткость конструкции каждой секции. Трубки в последней не могут свободно расширяться. Кроме того, болтовые связи смежных водяных камер ограничивают тепловое расширение отдельных секций.

2. Невозможность поддерживать давление в данных котлах выше

чем в камерных. У котлов Ситона водяные камеры имели сравнительно большие размеры и плоскую форму.

3. Трудность ухода за котлами. Особенно много хлопот доставляло устранение течи в соединениях крышек с водяными камерами. Поверхность соединения последних весьма велика.

4. Увеличение веса котла из-за большого числа паровых коллекторов.

Перечисленные здесь недостатки котлов Ситона явились основной причиной крайне ограниченного применения их на судах.

98. Котлы Бабкока и Вилькокса (B и W) (США)

Наиболее совершенные секционные котлы были разработаны фирмой Бабкок и Вилькокс[1] в США.

Военный флот США начал особенно быстро развиваться лишь с 60-х гг. XIX в., когда на территории Америки велась междоусобная война Севера с Югом (1861—1865 гг.

За время войны США создали весьма крупный военный флот (179 судов с общим водоизмещением 166 000 *т* с 1110 орудиями) и вооружили 497 торговых пароходов.

Война указала американцам на необходимость максимального сокращения времени на разводку котлов для повышения тактических свойств кораблей.

Такому требованию более всего отвечали водотрубные котлы. Поэтому все отечественные изобретения водотрубных котлов, в частности котлы Бабкока и Вилькокса, тщательно испытывались для выяснения возможности применения их в военном флоте.

В дальнейшем столкновения США с государствами Европы (спор с Германией из-за островов Самоа и с Англией за обладание Беринговым морем, столкновения с Францией из-за Панамского канала, Чилийская междоусобная война, в которой было нарушено международное право США — в одном из портов была произведена погрузка боевых припасов) заставляли США развивать свой военный флот. Много способствовал этому и основной девиз США того времени: «Америка для американцев». В таких условиях котлы B и W получили большое распространение.

Прототипом котлов B и W явился котел Стефенса Вилькокса, построенный в 1856 г., котлы же B и W появились в 1876 г. (рис. 129).

Котел Бабкока и Вилькокса (рис. 129 a) состоял из парового коллектора и большого числа водяных камер (коллекторов), соединяющихся между собой и с паровым коллектором трубками. Стремление получить шахматное расположение труб побудило конструкторов придать коллекторам волнистую форму (рис. 129 b). Устройство таких сложных по форме коллекторов было возможно только благодаря высокоразвитым техническим средствам американских заводов того времени.

Водяные коллекторы соединялись между собой одним или двумя рядами кипятильных трубок. Каждая пара коллекторов с трубками образовывала секцию (рис. 129 b, 129 c). Поэтому котлы B и W часто называют секционными. В двурядных секциях трубки располагались змейкой по две или по четыре (рис. 129 b и 129 c).

[1] VDI. Стр. 1146, 1148, 1896; TINA. Стр. 267—297, 1896. Англ. пат. № 1154, 1873 г. и № 24672, 1899 г. Нем. пат. № 70697, 1893 г.; № 91411, 1896 г.; русск. пат. № 153, 1897 г.

Каждый передний водяной коллектор соединялся с паровым коллектором посредством одной (рис. 129 а) или двух (рис. 130, 130 а) трубок. Последние входили в паровой коллектор приблизительно на уровне воды в нем. Благодаря этому сопротивления движению пароводяной смеси в коллекторе получались небольшие. Пароводяная смесь проходила лишь тон-

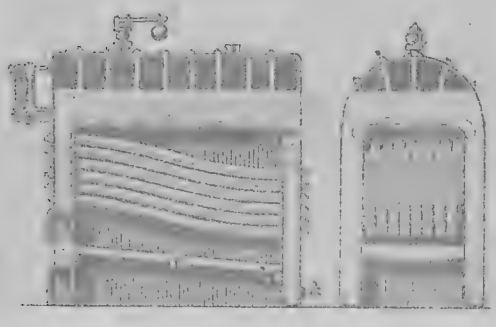


Рис. 129. Котел Стефенса Вилькокса 1856 г.

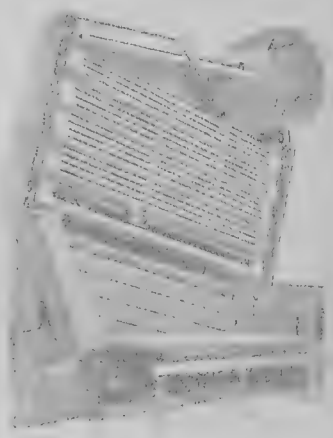


Рис. 129а. Котел Бабкока—Вилькокса (B и W).

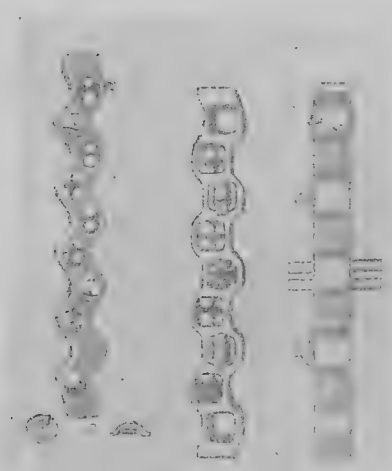


Рис. 129b. Секционные коробки котла B и W.

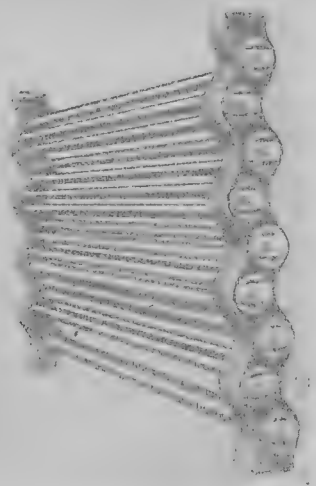


Рис. 129с. Секции котла B и W.

кий слой воды. Пропускание пароводяной смеси через слой воды в коллекторе способствовало осушению пара. Для этой же цели в коллекторе устанавливались отбойные листы, а на коллекторе — паросушитель (рис. 130 а).

Задние водяные коллекторы соединялись с паровым коллектором патрубками в наинизшем уровне водяного пространства коллектора. Поэтому ни одна незасоренная секция не могла остаться без воды, даже при весьма низком уровне ее в коллекторе. Это было весьма ценным преимуществом котла.

Циркуляция воды и процесс парообразования в данном котле происходили таким образом. Питательная вода поступала в паровой коллектор, где она нагревалась за счет теплоты, выделяемой при конденсации пузырьков пара. При нагревании воды [1] из нее выделялся

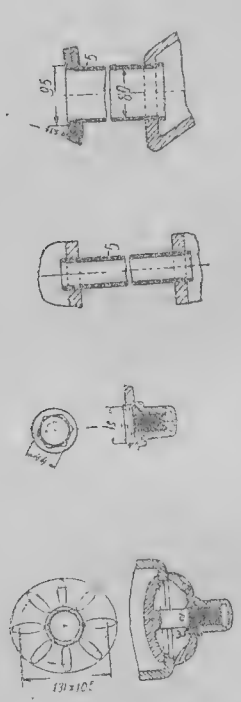


Рис. 129d. Детали секции котла B и W.

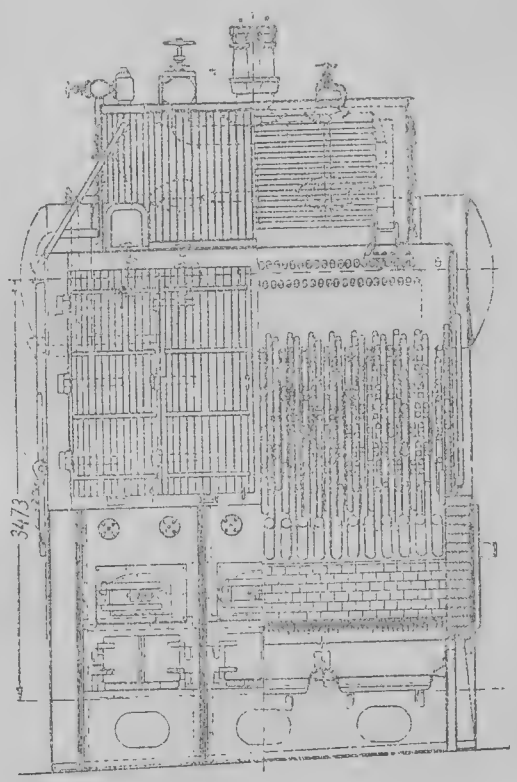


Рис. 130. Котел B и W.

остаток воздуха, который уходил вместе с паром к паровым двигателям. Подогретая питательная вода спускалась в задние водяные коллекторы и распределялась затем по кипятильным трубкам. Поднимаясь по последним, вода частично превращалась в пар.

Наибольшая доля воды превращалась в пар в нижнем ряду трубок. Объем пароводяной смеси и скорость ее движения по этим трубкам получались весьма большие, отчего сопротивление движению пароводяной смеси было чрезмерно велико. Для уменьшения скорости движения пароводяной смеси, а стало быть, и сопротивления ее движению нижние ряды кипятильных труб делались большего диаметра. (В котлах B и W увеличивают диаметр нижних кипятильных

[1] Основная масса воздуха из питательной воды выделялась в водяном экономайзере.

труб и в настоящее время, только не у одного нижнего ряда, а у двух или трех.)

Из кипятильных трубок пароводяная смесь переходила в передние водяные коллекторы. По ним пароводяная смесь поднималась вверх. Если в верхних рядах кипятильных трубок парообразование было весьма слабо, то часть воды из передних водяных коллекторов могла по верхним трубкам переходить в задние. Другая же часть воды вместе с паром, образовавшимся в кипятильных трубках, попадала из передних водяных коллекторов через соединительные трубы в паровой коллектор. Из последнего пар уходил к паровому двигателю, а вода снова опускалась в задние водяные коллекторы.

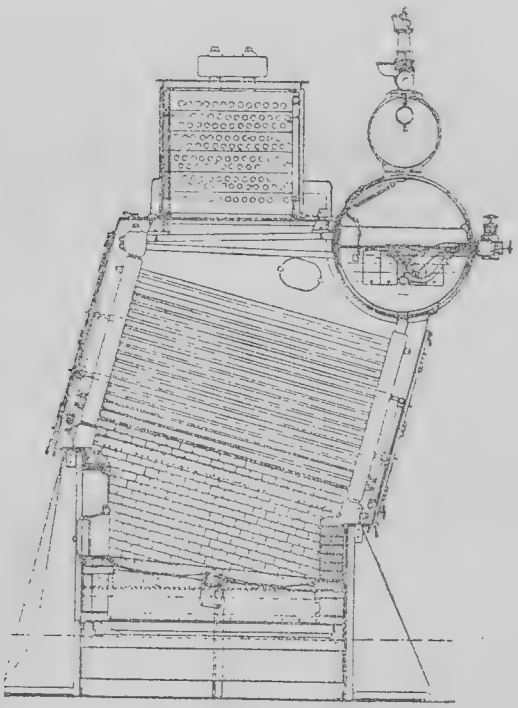


Рис. 130a. Котел B и W.

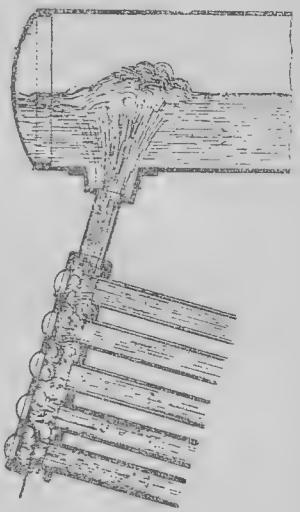


Рис. 130b. Схема движения пара и воды в коллекторах.

Таким образом, циркуляция воды в котлах B и W могла происходить по двум кольцам. Одно кольцо составляли паровой коллектор, задние водяные коллекторы, кипятильные трубки, передние водяные коллекторы, соединительные трубки и снова паровой коллектор. Во второе кольцо входили задние водяные коллекторы, нижние ряды кипятильных трубок, передние водяные коллекторы, верхние ряды кипятильных трубок и снова задние водяные коллекторы.

Для уменьшения гидравлических сопротивлений движению по ним пароводяной смеси трубы, соединяющие передние водяные коллекторы с паровым коллектором, имеют такой же диаметр, как и нижний ряд кипятильных трубок. В некоторых котлах B и W для этой цели верхние соединительные трубы заменялись паровым коллектором, расположенным параллельно кипятильным трубкам. Благодаря этому, сопротивление движению пароводяной смеси вдоль коллектора было в десятки раз меньше, чем в соединительных трубках и водяных коллекторах. Некоторое представление о характере движения пароводяной смеси в водяных коллекторах и соединительных па-

трубках может дать рис. 130 b. Однако, замена соединительных трубок параллельными паровыми коллекторами наряду с улучшением принесла с собой и большой недостаток. Необходимость установки вместо одного, двух или трех коллекторов сильно утяжеляла вес котла. Поэтому котлы B и W с продольными коллекторами получили распространение лишь в стационарных установках.

На рис. 129 b, 129 c и 129 d показаны секции котла B и W и ее детали. Крышки для трубных горловин (рис. 129 d) выполнялись в виде конических пробок. Пробки прижимались к своим гнездам с одной стороны колпакообразными гайками, а с другой — внутренним давлением пара. Под пробки для большей плотности ставились металлические прокладки. Внизу каждого водяного коллектора име-

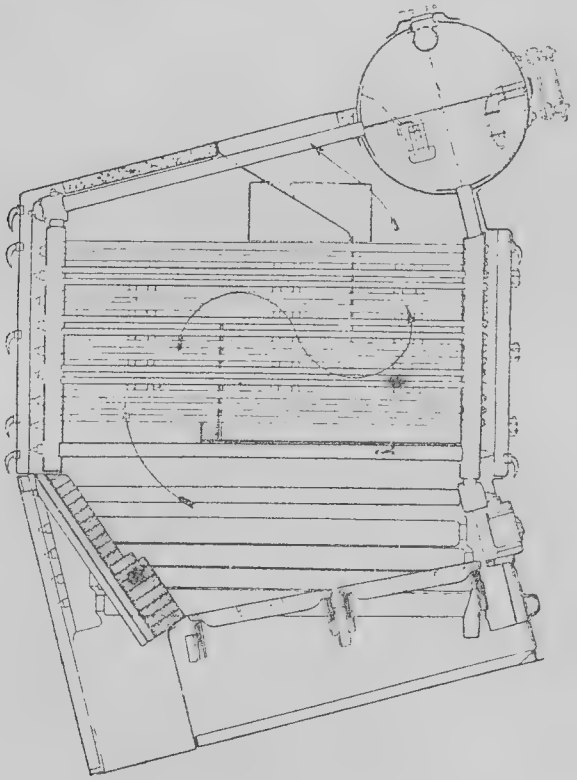


Рис. 130c. Котел B и W образца 1899 г.

лась сравнительно большая горловина эллиптической формы для возможности очистки коллектора и введения в него конических пробок. Горловины закрывались колпакообразной крышкой (рис. 129 d второй снизу). Для данных крышек употреблялась асбестовая прокладка.

Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду к боковым кожухам плотно ставили по одной секции кипятильных трубок.

Питательная вода перед поступлением в паровой коллектор предварительно нагревалась в водяном экономайзере, устанавливаемом над соединительными трубками (рис. 130, 130 a). Применение водяного экономайзера позволило значительно повысить к. п. д. котельной установки. Все же от постановки экономайзера в позднейших

конструкциях котлов B и W (рис. 130 с) отказались, так как они довольно быстро выходили из строя.

Основная причина повреждения экономайзера заключалась в коррозии его трубок от действия кислорода воздуха, поступающего с питательной водой. Деаэрацию (освобождения от воздуха) питательной воды в судовых котельных установках в то время не производили.

В 1899 г. был разработан новый судовой котел B и W (рис. 130 с), в котором для сохранения высокого к. п. д. пришлось увеличить скорости газов путем уменьшения сечения газоходов. Конструктивно это было осуществлено устройством в трубном пучке одной продольной и двух поперечных перегородок. Поперечные перегородки располагались таким образом, чтобы по возможности сохранить одинаковые скорости газов (объем газов по мере охлаждения уменьшался). Эксплоатационные наблюдения подтвердили расчеты конструкторов. К. п. д. котла получался таким же, как и у котлов B и W с водяным экономайзером.

Кроме того, данный котел выгодно отличался от ранее рассмотренного (рис. 130, 130 а) отсутствием в нем паросушителя, а также экранированием боковых стенок топок. Отсутствие паросушителя позволило значительно уменьшить высоту котла, а экранирование повысило паропроизводительность котла и увеличило срок службы боковых стенок топки.

Одновременно в данной конструкции появились и новые недостатки, а именно: а) Увеличились сопротивления движению газов. Для их преодоления пришлось увеличить мощность воздушного вентилятора. б) Заносились золой часть *II* и *III* газоходов. Для удаления золы из газоходов пришлось предусмотреть доступ к котлу с боковых сторон.

Против котлов Бабкока и Вилькокса были выдвинуты следующие основные возражения: а) Относительно большой вес. б) Большая жесткость отдельных секций, не дававшая возможности трубам свободно расширяться и вызывавшая прогибание преимущественно нижних труб секции и образование течи. в) Слабая циркуляция воды. г) Наконец, основное возражение, особенно для военного флота — это необходимость иметь свободное пространство для возможной выемки отдельных секций или котла в целом.

Таблица 43

Число котлов Бабкока и Вилькокса, установленных и строившихся для военных судов до 1900 года включительно

№ по пор.	Название страны	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	США	7	43	41 000
2	Великобритания	2	5	4 000
3	Дания	1	1	1 000
		10	49	46 000

Но преимущества котлов Бабкока и Вилькокса были настолько велики, что они заставляли мириться с их недостатками.

Главные преимущества котлов B и W были следующие:

1. Возможность свободного расширения каждой секции отдельно.
2. Полная взаимозаменяемость отдельных секций.
3. Легкость замены любой негодной трубы.
4. Стандартизация почти всех деталей, в связи с чем убыстрялся и удешевлялся ремонт котлов.

В табл. 43 приведены данные о распространении котлов Бабкока и Вилькокса на военных судах до 1900 г. включительно.

99. Котлы Гейторна (Англия)

Одним из основных недостатков котлов Бабкока и Вилькокса считалась жесткость соединения труб в секции, вызывающая течи или прогибание труб в местах развальцовки.

Чтобы свести к минимуму этот недостаток, Гейторн[1] предложил в 1894 г. секционный котел с кривыми кипятильными трубками и с прямыми, а не змеевидными коллекторами (рис. 131).

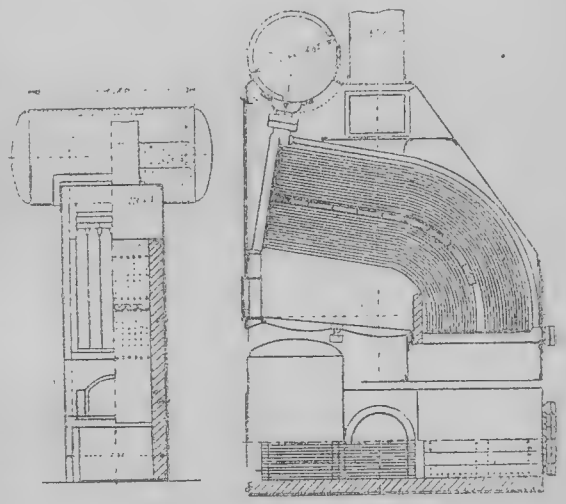


Рис 131 Котел Гейторна.

Замена волнистых коллекторов прямыми сильно удешевляла производство котлов. Но кипятильные трубки в котле Гейторна пришлось разместить не в шахматном порядке, а в затылок, что при прочих равных условиях вело к уменьшению паропроизводительности.

Другой отличительной особенностью котлов Гейторна было крепление труб в камерах.

Кипятильные трубки ввинчивались в водяную камеру (рис. 132) посредством специальных колец с внутренней и наружной резьбой. Внутренняя нарезка имела 16 ниток на дюйм, а наружная — только 12.

Крепление трубок в камеру производилось так: сначала навинчивали кольцо на кипятильную трубку, затем кольцо ввинчивали в выступ камеры с внутренней нарезкой. Благодаря меньшему количеству ниток на наружной резьбе кольца, трубка ввинчивалась до упора со стенкой камеры. Этим достигалось плотное металлическое соединение без всякой прокладки.

Камера вверху разделялась перегородкой на две части. В одну часть камеры вода поступала из парового коллектора, затем она попадала в верхний ряд циркуляционных труб большого диаметра и по ним спускалась в нижние коллекторы секций котла.

Генерация пара и циркуляция воды здесь происходили так же, как и в котле Бабкока и Вилькокса. Шамотная перегородка заставляла газы двигаться вдоль трубок.

[1] VDI. Стр. 1148, 1896; Engineering. Стр. 680, 1895. Англ. патенты 1894 г. № 12846; 1899 г. № 24836. Нем. пат. № 84515, 1895 г.

Таблица 44

Основные характеристики котла Гейтория, рассматриваемого в таблице

$H_к = 40\ м^2$; $R = 0{,}63\ м^2$; $G_{к+в} = 4{,}25\ т$; $G_в = 0{,}6\ т$; $\frac{G_{к+в}}{H_к} = 106\ кг/м^2$; $\frac{G_к}{H_к} = 91{,}5$; $\frac{G_{к+в}}{D} = 2{,}26\ кг/кг$; $\frac{G_к}{D} = 1{,}96\ кг/кг$

№ по пер.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1	Время испытания — 1895 г. [1]			11/IV	30/IV	1/V	2/V	30/V	12/VI	14/VI	11/VI
2	Сожжено топлива в час	B	*кг/ч*	45,3	54,5	31	46,3	123	153	208	228
3	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	72	86	49	74	195	243	330	362
4	Испарено воды в час	D	*кг/ч*	4113,0	450	264	410	1160	1250	1530	1650
5	Получено стандартного пара в час, полагая $\Delta i = 540\ кал/кг$	D_c	»	500	515	320	500	1410	1520	1880	2030
6	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	10,3	11,2	6,6	10,2	29	31	38,2	41,2
7	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла, полагая $\Delta i = 540\ кал/кг$	$\frac{D_c}{H_к}$	»	12,5	13,6	8	12,5	36	38	47	50,7
8	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	10,3	11	11,5	13,7	16,9	16,1	17,5	17,7
9	Температура пара (пар сухой)	$t_п$	°Ц	185	187	189	196	205	204	207	207
10	Давление воздуха в зольнике	$\Delta S_з$	*мм* вод. ст.	—	—	—	—	50,8	63,5	43	63,5
11	Температура воздуха, поступающего в котельную	$t_в$	°Ц	13	14,5	14	15,5	26,7	17	15,5	15,5
12	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	9,1	8,2	8,6	8,86	9,45	8,15	7,39	7,24
13	Стандартная испарительность топлива, полагая $\Delta i = 540\ кал/кг$	$И_с$	»	11,1	9,37	10,5	10,86	11,6	9,94	9,01	8,9

[1] Опыт № 1 провел Барр; опыты № 2—8 — Уаткинсон.

Барр и Уаткинсон во время опытов с этими котлами (табл. 44) довели сжигание на каждом $м^2$ колосниковой решетки до 360 *кг* угля в час, т. е. с 1 $м^2$ решетки в час выделялось примерно 2 500 000 *кал*, причем испарительность топлива составляла 7,24.

При сжигании на 1 $м^2$ решетки 46,5 *кг* угля в час, испарительность топлива подымалась до 8,86. Испытываемый котел весил с водой 4,25 *т*, а вес воды составлял 0,6 *т*.

Котлы Гейторна строились в Англии, главным образом, для торгового флота. Большого распространения эти котлы не получили из-за невозможности производства внутренней очистки труб.

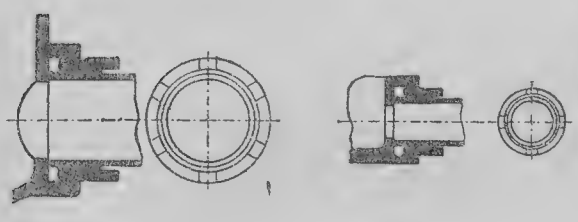


Рис. 132. Закрепление трубок в котле Гейторна.

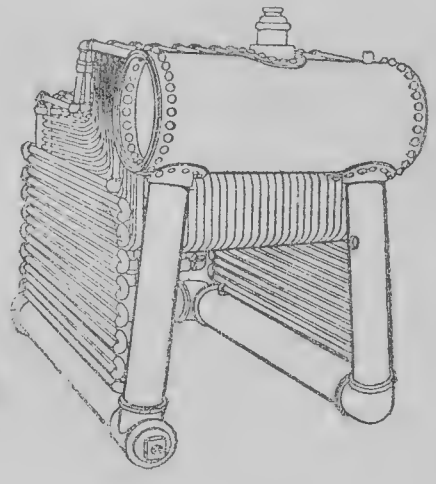


Рис. 133. Котел Бойера.

100. Котел Бойера (США)

Показанный на рис. 133 котел Бойера[1] был установлен на яхте «Rex». Давление пара в котле составляло 22 *ати*, а вес котла был равен 2,125 *т*.

Котел состоял из парового коллектора, U-образного водяного коллектора, пучка кипятильных труб и экрана. Из заднего водяного коллектора и из парового коллектора назад шли два ряда трубок, соединявшихся между собой кипятильными трубками, изогнутыми под прямым углом. Эти котлы по схеме своего устройства несколько напоминали котлы Гейторна. Отличались они от последних тем, что у них кипятильные трубки входили в тяжелые водяные коллекторы.

Боковые и задняя стенки топки были экранированы. Каждый из экранов состоял из зигзагообразно согнутой длинной трубы. Труба эта соединялась из отдельных элементов труб посредством колен.

Конструкция котлов Бойера еще раз указывает на то, что американская котельная техника взяла совершенно правильный курс на полное экранирование топок. Это являлось основным преимуществом рассматриваемого котла. Но экран здесь был неправильно оформлен конструктивно. Большое число крутых поворотов трубок экрана давало очень высокие гидравлические сопротивления продвигающейся по ним пароводяной смеси. Напор воды в циркуляционной трубе был совершенно недостаточен для преодоления этих сопротивлений. Данное обстоятельство ограничивало повышение паропроизводительности котла и ухудшало условия работы экранных трубок. Положительным было то, что в котле Бойера все его части, подвергающиеся нагреванию, имели полную свободу расширения.

---

[1] VDI. Стр. 1234, 1896. Англ. пат. 1895 г. № 453.

Из недостатков котла следует еще отметить:

1. Невозможность внутренней очистки труб экрана и конвекционного пучка.

2. Слабую циркуляцию в экране и котле, ограничивающую повышение паропроизводительности котла.

Благодаря своим недостаткам котлы Бойера имели очень ограниченное применение.

Из других секционных котлов с изогнутыми трубками заслуживает внимания конструкция котла Солиньяка-Гриля.

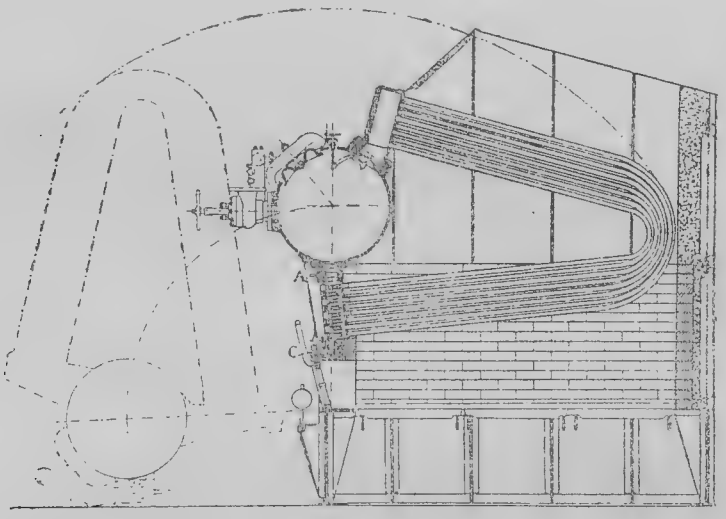


Рис. 134. Котел Солиньяка-Гриля.

101. Котел Солиньяка-Гриля (Франция)

Котел Солиньяка-Гриля[1] состоял из отдельных секций. Отличительной особенностью этого котла (рис. 134) была возможность отделения любой секции от парового коллектора посредством самозапирающегося клапана у верхней камеры и крана *A* у нижней. Благодаря такому устройству можно было продуть каждую секцию в отдельности. Для этого требовалось закрыть кран *A* и открыть спускной кран *C*. Такое временное выключение секций во время действия котла часто было необходимо; например, для постановки пробок в случае повреждения одной или нескольких кипятильных труб.

Другой особенностью котла Солиньяка была возможность поворота его на 90° для тщательного осмотра и наружной очистки труб (пунктирное положение на рис. 134).

Заметим, что в датском флоте котлы Торникрофта для этой же цели после каждой кампании переносили с корабля на берег. Плавание между чистками продолжалось лишь несколько недель.

Котел Солиньяка-Гриля не получил широкого распространения из-за тех же недостатков, что и котел Бойера: главным образом, из-за невозможности внутренней очистки труб и недостаточной циркуляции в котле, обусловливаемой большими гидравлическими сопротивлениями при малом напоре воды.

[1] Буслей. Судовые водотрубные котлы. Перев. Голова. СПБ, 1903 г. Англ. патенты № 103, 1883 г.; № 20553, 1900 г.; № 20629, 1900 г. Нем. пат. № 137985, 1900 г. Русск. пат. № 8911, 1900 г.

ОДНОКАМЕРНЫЕ КОТЛЫ

Жесткость конструкции двухкамерных котлов вызывала частые появления течи в местах развальцовки труб, в камерах и в присоединениях последних к коллекторам. В связи с этим, конструкторы в 80—90-е гг. XIX в. разрабатывали и другие типы котлов, у которых упомянутая жесткость или отсутствовала бы или, в крайнем случае, была сведена к минимуму.

К этой группе котлов относятся однокамерные котлы Пти и Годара, Торникрофта, Маршалла, Мошера и др.

102. Котлы Пти и Годара (Франция)

Котел Пти и Годара[1] (рис. 135) состоял из двух водяных камер, из которых зигзагообразно выходили кипятильные трубки. Для более легкого продвижения паровых пузырьков трубки имели небольшой уклон кверху. Верхние и нижние концы трубок присоединялись к той же водяной камере.

Такое устройство позволяло выделенному объему воды циркулировать по камере и кипятильным трубкам несколько раз до полного испарения.

Пар, поступающий из кипятильных трубок в верхнюю часть камеры, отводился оттуда трубой в паровое пространство коллектора, снабженного щитами для сепарации и пара. Вода в камеру поступала из коллектора по спускным трубам, идущим сзади котла. Топка, выложенная из кирпича, была расположена перед поверхностью нагрева котла. На рис. 135 справа показана форма рядов труб, ближайших к топке.

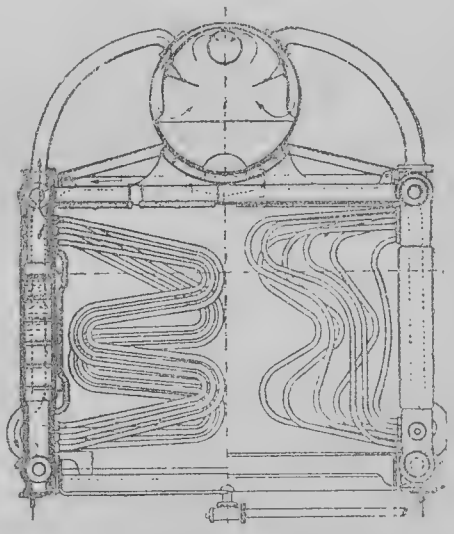


Рис. 135. Котел Пти и Годара.

Обмуровка топки во время форсированной работы котла нагревалась настолько, что обслуживание ее кочегарами становилось почти невозможным.

Характеристики котла Пти и Годара, по данным испытаний (табл. 45), получились хорошие, особенно в отношении $\frac{B}{R}$ и $\frac{D}{H_к}$. Тем не менее рассматриваемые котлы пришлось переделать под нефтяное отопление, так как при угольном отоплении передние ряды трубок часто перегорали от действия на них факела. При форсированной работе стенки топки настолько сильно нагревались, что обслуживание котла становилось почти невозможным. Когда же, кроме приспособления топки под нефтяное отопление, было сделано воздушное охлаждение ее стенок и устранен удар факела в трубки котла, этот же котел на данном миноносце проработал сравнительно хорошо более 10 лет.

[1] Girard. Chaudières marines. Стр. 277—281. Paris, 1897. Англ. пат. № 17026, 1887 г.

Таблица 45

Результаты испытания котлов Пти и Годара, установленных на французском миноносце „Bouet Willaumez"

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Дата испытания	—	—	21/XI 1891
2	Продолжительность испытания . . .	Z	час.	2
3	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	97,66
4	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	2631
5	Давление в котле	$P_к$	*ати*	9,9
6	Давление воздуха в котельной . . .	$\Delta S_{к-й}$	*мм* вод. ст.	30
7	Часовой расход топлива	B	*кг/ч*	493
8	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	235
9	Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	„	495
10	Паропроизводительность котла . . .	D	*кг/ч*	3910
11	Испарительность топлива	$И$	*кг/кг*	7,96
12	Вес котла на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/т*	3230

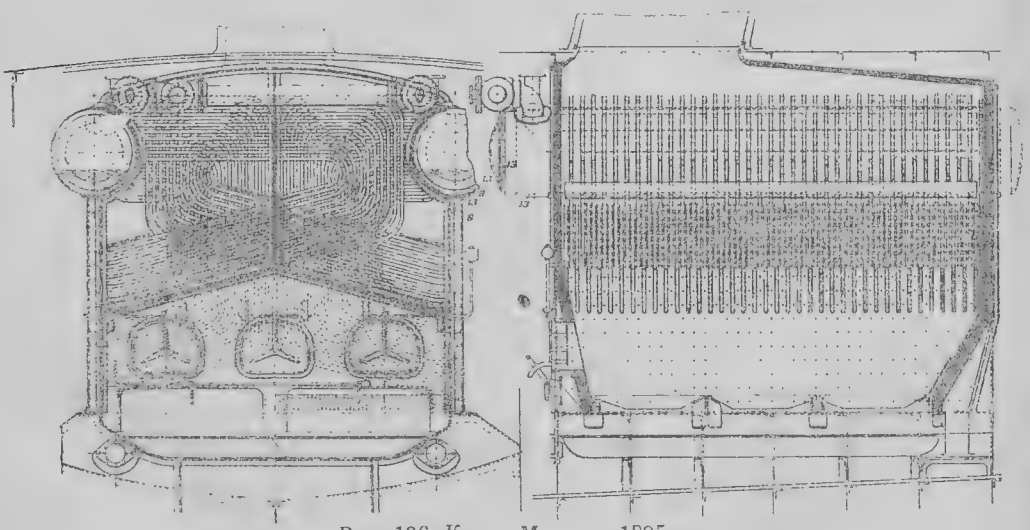


Рис. 136. Котел Мошера 1895 г.

103. Котлы Мошера (США)

Котлы Мошера[1] строились в 90-е гг. для американских миноносцев. Поверхность нагрева котла Мошера, изображенного на рис. 136,

[1] VDI. Стр. 1145, 1896.

составляла 220 $м^2$, площадь колосниковой решетки 4,4 $м^2$, а давление пара 17,5 *ати*. Диаметр кипятильных труб принимался равным 25/20 *мм*. Топка котла была почти полностью экранирована.

На рис. 137 показано конструктивное выполнение водяной камеры и ее соединение с коллектором. От каждой водяной камеры шли кипятильные трубки, наклоненные кверху под углом примерно в 15°. Все трубки располагались в затылок. Горловины камер закрывались трубками на резьбе, затем эти трубки загибались и входили в паровое пространство своих же коллекторов. Таким же образом шли и трубки экрана, показанные на рис. 136 пунктирными линиями.

Котел Мошера представлял собой по существу два котла, ничем не связанные друг с другом, если не считать общей для обоих коллекторов питательной и паровой трубы. Ряды труб каждого котла крестообразно чередовались между собой. Такое устройство котла позволило достигнуть очень хорошей эластичности. Вместе с тем, это преимущество породило в котле и новый недостаток, а именно невозможность внутренней очистки кипятильных труб, что не дало возможности котлу получить распространение во флоте.

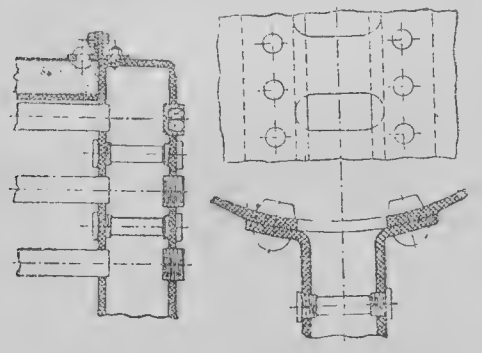


Рис. 137. Водяные камеры котла Мошера.

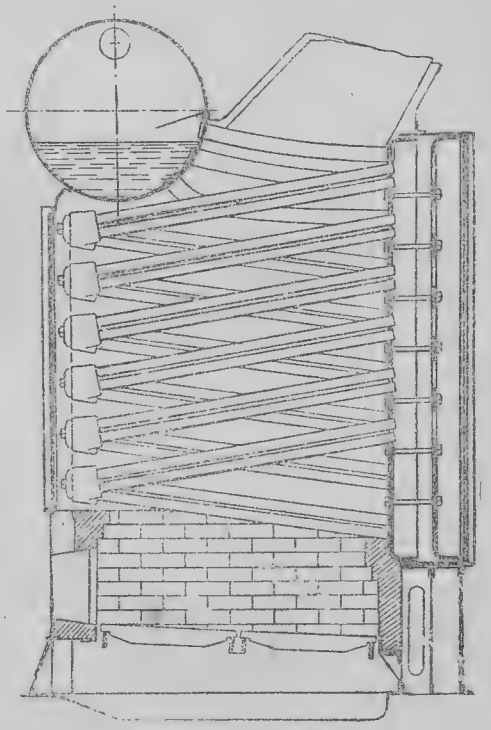


Рис. 138. Котел Торникрофта-Маршалла с прямыми трубками.

104. Котлы Торникрофта-Маршалла

Котел Торникрофта-Маршалла[1] (рис. 138) состоял из парового коллектора, водяной камеры и прямых кипятильных трубок. Слегка изгибались только три верхние ряда кипятильных трубок, соединяющих водяную камеру с паровым коллектором.

Отличительной особенностью котла была развальцовка труб в водяной камере под косым углом, что было вызвано требованием сохранить прямолинейность кипятильных трубок. Прямые трубки одним концом развальцовывались в водяных камерах, а другим — в соединительных коробках. Для осмотра и внутренней очистки труб

[1] Max Dietrich. Der moderne Dampfkessel der Kriegs- u. Handelschiffe. Стр. 419, 1908 (с кривыми трубами). Нем. пат. № 122743, 1900 г.; № 134461, 1900 г. Англ. пат. № 22416, 1899 г.; № 6243, 1900 г. (с кривыми трубами) и № 6720, 1899 г.

в соединительных коробках имелась лишь одна горловина на две трубки, в то время как в водяной камере горловины делались против каждой трубки. Такое устройство позволило уменьшить число горловин на 25%.

Вода в коллекторе поддерживалась примерно на высоте 1/3 его диаметра. Для улучшения циркуляции воды все трубки были наклонены к горизонту под углом около 30°.

Циркуляция в данном котле происходила следующим образом. Питательная вода поступала в паровой коллектор. Из парового коллектора вода по второму и третьему верхним рядам трубок входила

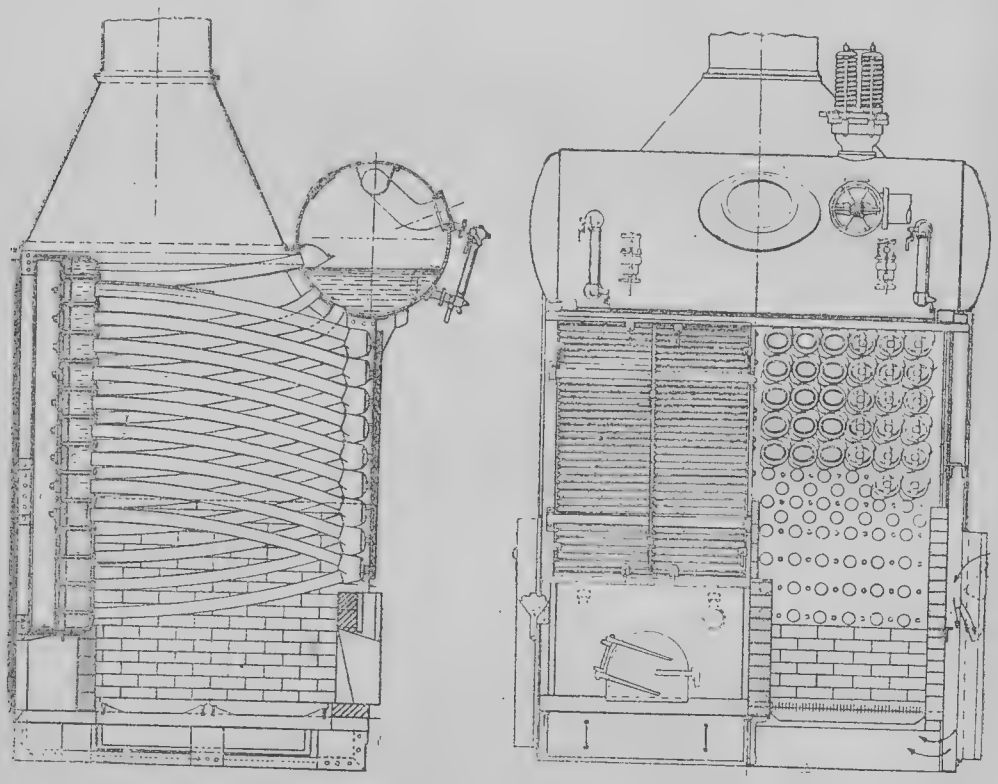


Рис. 139. Котел Торникрофта-Маршалла с кривыми кипятильными трубками.

в водяную камеру. Из последней вода распределялась по трубкам, идущим от камеры кверху. Дойдя до соединительных коробок, вода поворачивалась почти на 110° и опять входила в ту же водяную камеру. Образовавшиеся в трубках пузырьки пара поднимались по водяной камере и входили через верхний ряд труб в паровой коллектор, увлекая с собой значительное количество воды. Для отделения воды от пара в паровом коллекторе был поставлен отбойный щит. Часть воды, поступившая в водяную камеру вместе с пузырьками пара, спускалась вниз и опять совершала такой же путь, как и раньше; следовательно одна и та же вода циркулировала до тех пор, пока не испарялась. Разумеется, количество испаренной воды непрерывно пополнялось свежей.

Котлы Торникрофта-Маршалла с прямыми трубками выявили в эксплоатации ряд преимуществ. К главным из них можно отнести:

1) свободный доступ к осмотру и очистке трубок и соединительных коробок;

2) легкость замены поврежденных трубок и соединительных коробок;

3) полную взаимозаменяемость как прямых кипятильных трубок, так и соединительных коробок.

Упомянутые преимущества обусловили собой появление в котле новых недостатков. Основные из них:

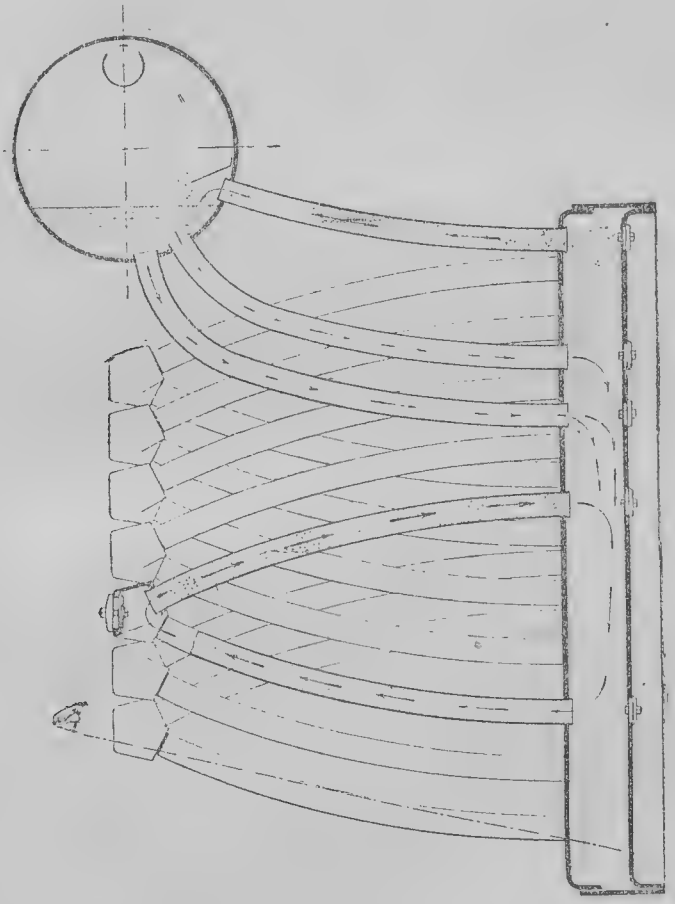


Рис. 139а. Котел Торникрофта-Маршалла с кривыми кипятильными трубками.

1) возможность появления течи в местах косой развальцовки кипятильных труб в водяных коллекторах;

2) жесткость конструкции котла, обусловленная применением прямых кипятильных трубок.

Для уменьшения последнего недостатка начали строить котлы с кривыми кипятильными трубками (рис. 139, 139а). Этот котел состоял из парового коллектора, водяной камеры и изогнутых по радиусу кипятильных труб диаметром по 82,55 *мм*. Трубы всех рядов, кроме одного верхнего, изгибались по радиусу 4,9 *м*. Трубы же верхнего ряда по конструктивным соображениям изгибались по другому радиусу.

Генерация пара и циркуляция воды в данном котле происходили так же, как и в котле Торникрофта-Маршалла с прямыми трубками. На рис. 139 показан котел, поверхность нагрева которого равна 11,5 $м^2$, а площадь двух колосниковых решеток — 3,019 $м^2$.

При 50% нагрузке этот котел производил 3960 *кг* стандартного пара в час. Мощность машин составляла 360 *и. л. с.* Вес котла с водой был равен 17,25 *т*.

При 100% нагрузке вес котла с водой на 1 *т* производимого им пара равнялся $\frac{G_{к+в}}{D} = 2180$ *кг/т*.

Позднее Торникрофт-Маршалл начал строить котлы для работы на повышенном давлении. Для этой цели он заменил одну водяную камеру несколькими парами коллекторов квадратного сечения (рис. 140). Каждая пара таких коллекторов вместе с трубками составляла секцию.

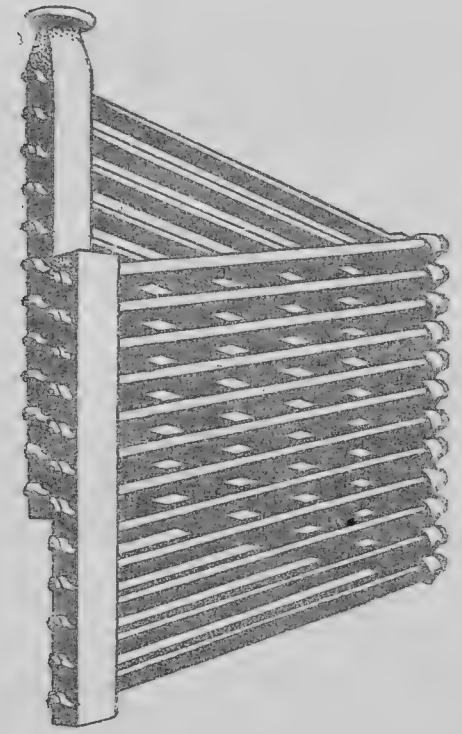


Рис. 140. Секция котла Торникрофта-Маршалла.

Для упрощения технологического процесса производства и ремонта котлов кипятильные трубки здесь применены прямые.

Половина коллекторов в данном котле присоединялась к паровому коллектору непосредственно, другая же половина коллекторов соединялась с паровым коллектором через общую питательную коробку и две циркуляционные трубы.

Образование пара и циркуляция воды здесь осуществлялись так же, как и в предыдущих котлах.

Важнейшими преимуществами секционных котлов Торникрофта-Маршалла являлась возможность массового производства деталей для них, так как все их детали стандартны; это также удешевляло и убыстряло ремонт котлов. Трубы и даже целые секции в случае аварии можно было заменять в течение нескольких часов.

К числу главных недостатков рассматриваемых котлов следует отнести необходимость иметь свободное пространство для возможной выемки секций котла.

105. Котлы Сампсона (Англия)

Из других секционных котлов заслуживает внимания котел Сампсона [1].

Паровые коллекторы у котла Сампсона выполнялись полуцилиндрическими (рис. 141). К плоскому днищу каждого коллектора крепилось 55 секций труб. Каждая секция состояла из 13 труб, распо-

[1] VDI. Стр. 1268, 1896. Англ. пат. № 10596, 1893 г.

ложенных в ряд. Наружная тринадцатая трубка каждой секции выводилась за обмуровку ее и служила как бы циркуляционной трубой для данной секции. Трубки каждой секции своими нижними концами ввинчивались в коллектор (рис. 142), а верхними развальцовывались в плоском днище парового коллектора.

Водяные коллекторы секций устанавливались так плотно друг к другу, что создавали газонепроницаемую трубную перегородку, одновременно являющуюся потолочным экраном.

Топочные газы двигались вдоль топки к задней ее стенке. Затем газы поворачивали на 180° и, пройдя два пучка труб, входили в два дымохода, расположенные у фронта котла.

К числу преимуществ котла Сампсона надо отнести:

1) возможность внутренней очистки труб;

2) малую вероятность высоких термических напряжений в секциях, так как все трубы каждой секции находились примерно в одинаковых температурных условиях.

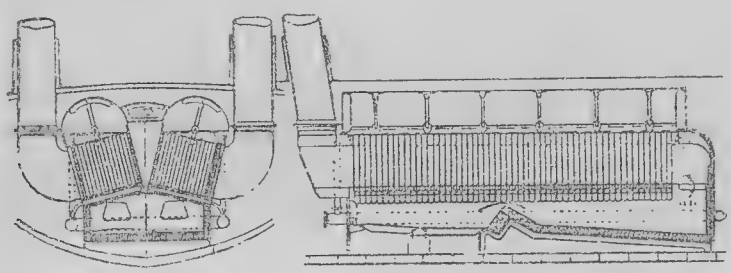


Рис. 141. Котел Сампсона.

Невыгодной особенностью котла Сампсона являлась система его питания, производимого не в паровой коллектор, а через U-образный водяной коллектор, расположенный снаружи обмуровки. Из U-образного коллектора вода вводилась в каждую секцию.

Подвод воды непосредственно в секции нерационален, так как при таком питании возможна коррозия кипятильных трубок. Применение полуцилиндрических паровых коллекторов ограничивало повышение давления в котле из-за недостаточной их прочности.

Вследствие данных недостатков котлы Сампсона не получили широкого распространения.

106. Котлы Мемфорда (Англия)

Котлы Мемфорда[1] в английском флоте ставили в 90-х гг. на паровые катеры, миноносцы и канонерские лодки. Поверхность нагрева изображенного на рис. 143 котла Мемфорда состояла из 8 четырехугольных секций труб. Секции эти своими верхними камерами соединялись патрубками с паровым коллектором. Посредством патрубков соединялись с водяными коллекторами и боковые камеры, причем то и другое соединение выполнялось на фланцах. Для лучшей циркуляции воды паровой коллектор соединялся с водяными коллекторами циркуляционными трубами. Путь циркуляции воды мог

[1] VDI. Стр. 1269, 1896. Hutton. Steam boiler construction. Стр. 374—375, London, 1898.
Англ. пат. № 8729, 1893 г. Нем. пат. № 76713, 1893 г.

происходить через циркуляционные трубы, водяные коллекторы, секции труб, паровой коллектор, снова циркуляционные трубы и т. д.

Одновременно циркуляция происходила и в каждой секции в отдельности.

По задним трубам, где происходило слабое парообразование, несмотря на идущие вверх в небольшом количестве паровые пузырьки, вода из верхней камеры опускалась в водяную камеру. Затем эта вода попадала в передние ряды труб, где частично превращалась в пар. Последний поднимался в верхнюю камеру, увлекая за собой и воду. Из камеры пар с небольшой частью воды уходил в паро-

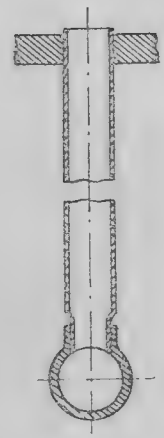


Рис. 142. Кипятильная трубка котла Сампсона.

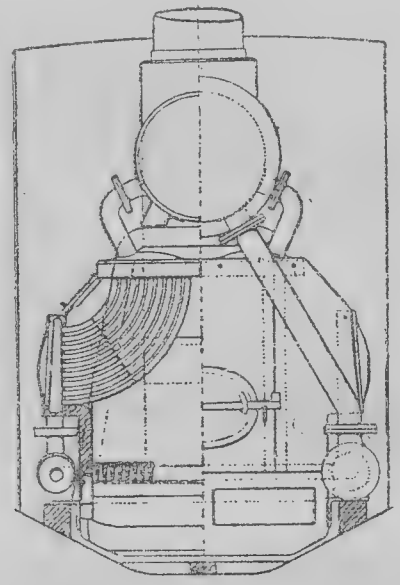


Рис. 143. Котел Мемфорда 1895 г.

вой коллектор, а другая часть воды снова опускалась по задним трубкам в нижние камеры, и снова начинался тот же цикл циркуляции воды.

Невыгодной особенностью этого котла являлась трудность внутренней очистки труб из-за их кривизны. В связи с этим трубки быстро приходили в негодность, и для их замены приходилось останавливать котел и снимать крышки камер. Такая замена труб обычно отнимала много времени.

Другим не менее важным недостатком был большой вес котла. Полный вес с водой четырех котлов этой системы мощностью в 3500 *и. л. с.*, установленных на английской канонерской лодке «Salamander», составлял 82 *т*; их суммарная поверхность нагрева была равна только 742 *м*². Вес котла, отнесенный к 1 *м*² поверхности нагрева, составлял 110 *кг* против 50 *кг* у рассматриваемых ниже секционных котлов Уорда.

Перечисленные здесь основные недостатки послужили причиной небольшого распространения котла в военном флоте.

107. Котел Уорда (США

Поверхность нагрева котла Уорда[1] состояла из подвесных труб с внутренними циркуляционными трубками и двухрядного экрана, покрывающего всю цилиндрическую поверхность топки.

Экранные трубки своими нижними концами ввинчивались посредством муфт в кольцевой экранный коллектор. Верхние же концы экранных труб загибались и ввинчивались при помощи муфт в вертикальный паровой коллектор. Внутри этого коллектора имелся кольцевой желобок, отделяющий отверстие двух верхних рядов экранных труб от двух нижних.

В паровом коллекторе (рис. 144) была перегородка, разделяющая его водяное пространство на две части. В нижнюю часть водя-

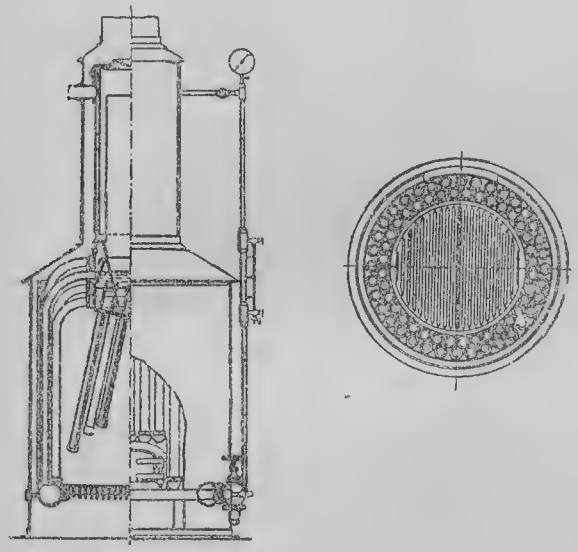


Рис. 144. Катерный котел Уорда 1884 г.

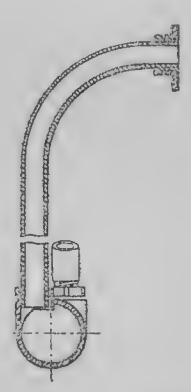


Рис. 144а. Водяной коллектор и кипятильные трубки котла Уорда.

ного пространства входили два нижних ряда экранных и три ряда подвесных трубок. Последние с обоих концов закрывались пробками. В пробки верхних концов было вставлено по две латунных трубки. Одна из них шла в нижний конец кипятильной трубы и служила циркуляционной трубкой, по которой вода должна была опускаться в кольцевое пространство подвесной трубы. Другая латунная трубка шла в верхнюю часть водяного пространства и служила для пропускания туда пароводяной смеси из подвесных труб.

Циркуляция воды в котле происходила так: питательная вода, поступающая в жолоб, опускалась по наружному ряду экранных труб в кольцевой экранный коллектор (рис. 144 а). Затем вода поступала во внутренний ряд экранных труб и поднималась по ним в нижнюю часть водяного пространства. Здесь вода распределялась по циркуляционным трубкам и попадала из них в кольцевое пространство подвесных труб. На пути вода частично превращалась в пар. Пароводяная смесь выходила из подвесных труб в верхнюю часть водя-

[1] DVI. Стр. 1234, 1269—1273, 1896. Hutton. Steam boiler construction. Стр. 344—45, London, 1898. Англ. пат. № 11617, 1888 г.

ного пространства. Пар в коллекторе подымался вверх и входил в сепаратор. Последний состоял из двух кольцевых перегородок, заставляющих пар два раза поворачивать на 180°. Во время резких поворотов влажного пара вода выпадала в кольцевой карман, откуда она по специальной трубке отводилась в нижнюю часть водяного пространства.

Таблица 46

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов	
				1	2
1	Поверхность нагрева	$H_к$	$м^2$	11,3	11,3
2	Площадь колосниковой решетки	R	„	0,342	0,342
3	Вес пустого котла с арматурой	$G_к$	*кг*	763	763
4	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	„	779,6	779,6
5	Продолжительность опыта .	Z	час.	24,25	23,75
6	Топливо	—	—	прессов. уголь	антрацит
7	Видимый расход угля за опыт	ZB	*кг*	526,1	313,6
8	Собрано провала за опыт . .	$ZB_{пр}$	„	57,37	65,3
9	Расход чистого угля	$ZB_ч$	„	468,73	250,1
10	Видимое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	63	38
11	Температура питательн. воды	$t'_к$	°Ц	18,7	18,8
12	Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_в)'_т$	°Ц	22,7	23,7
13	Пар совершенно сухой . . .	—	—	—	—
14	Испарено воды за опыт . . .	ZD	*кг*	4108,8	2339,5
15	„ „ „ час . . .	D	*кг/ч*	170	102
16	Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	15	9
17	Вес котла с водой на 1 *кг* производ. пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/кг*	4,6	7,6
18	Вес котла с водой на 1 $м^2$ поверхности нагрева . .	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	70	70
19	Давление пара в котле . . .	$P_к$	*ати*	0	0
20	Получено *кг* стандартного пара на килограмм угля .	$И_с$	*кг/кг*	8,55	9,08
21	Примерный к. п. д. котла .	$\eta_к$	%	59	62,5

Пар осушался не только механически, но также и за счет нагрева его уходящими газами. Ниже мы приводим основные характеристики рассматриваемых здесь котлов Уорда (табл. 46).

Из всех данных таблиц обращают на себя внимание высокая испарительность топлива и небольшое $\frac{G_{к+в}}{H_к}$, равное в котлах Уорда 70 *кг/м²* против 243 у котлов Пенелля.

Что касается $\frac{B}{R}$ и $\frac{D}{H}$, то они получились небольшими, потому что применялась естественная тяга.

Несколько позже для увеличения поверхности нагрева и площади колосниковой решетки котлы Уорда стали делать не цилиндрическими, а квадратными (рис. 145).

Котлы Уорда получили большое распространение в Америке на паровых катерах, так как они по сравнению с другими катерными котлами имели ряд преимуществ:

1. Занимали небольшую площадь.

2. Почти вся их поверхность нагрева воспринимала тепло, главным образом за счет излучения, и поэтому паропроизводительность 1 *м²* поверхности нагрева была высокой.

3. Поврежденные трубки легко заменялись новыми, потому что доступ к ним был свободный.

4. Вскипание почти отсутствовало.

5. Движение дымовых газов встречало небольшие сопротивления.

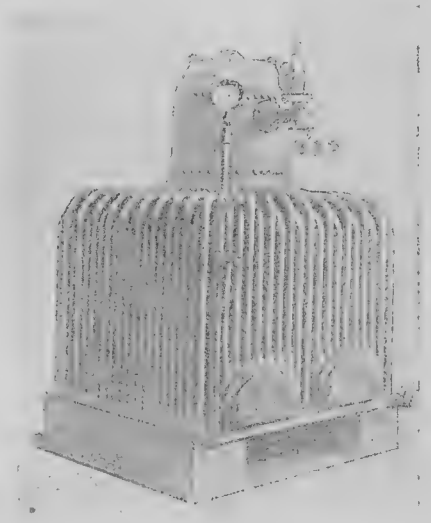


Рис. 145. Вторая конструкция катерного котла Уорда.

К числу главных недостатков котла Уорда следует отнести:

1. Невозможность внутренней очистки труб.

2. Недостаточно хорошую циркуляцию воды, так как образующиеся паровые пузырьки должны были двигаться не только вверх, но и вниз, что в сильной степени затрудняло нормальную циркуляцию.

Последний недостаток был исправлен Уордом при постройке им котлов (рис. 146, 146 а) для парохода «Meteor»[1] и для броненосца береговой обороны «Monterey»[2].

Новый котел Уорда несколько напоминал секционный котел B и W. Отличался он от последнего тем, что у него, во-первых, трубные секции были не прямые, а изогнутые по полукругу, во-вторых, паровой коллектор был расположен не горизонтально, а вертикально и, в-третьих, каждая секция соединялась своими обоими концами не непосредственно с паровым коллектором, как у котлов Бабкока и Вилькокса, а через сборные паровые водяные коллекторы.

Парообразование и циркуляция воды в этом котле происходили так: питательная вода поступала в нижнюю часть парового коллектора, там она шла по питательной трубе почти до уровня воды в кол-

[1] Engineering. Т. II, стр. 171, 1885.

[2] Journal of the American Society of naval engineers. Washington. Стр. 127, 1893 г.

лекторе. Затем вода опускалась вниз и, пройдя сетку, попадала в основной своей массе в правый водяной коллектор; другая же небольшая часть воды попадала в левый коллектор. Из правого водяного коллектора вода подымалась по 9 вертикальным трубам в секционные коробки, откуда она входила в кипятильные трубки. Последние шли в обе стороны от этих камер. Все трубки изгибались по полукругу, так что они образовывали два полукруглых пучка труб.

Для более легкого продвижения паровых пузырьков кипятильные трубки имели небольшой уклон кверху. Образовавшаяся в этих трубках пароводяная смесь входила затем в другие секционные коробки,

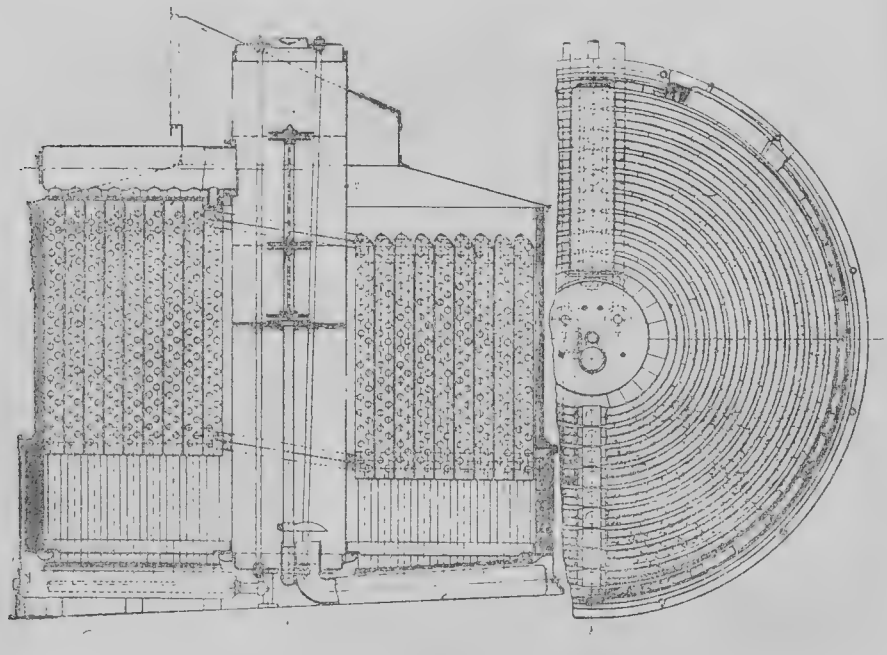


Рис. 146. Котел Уорда для больших судов.

расположенные с левой стороны коллектора. Коробки эти своими верхними концами соединялись в сборный коллектор. Из левых секционных коробок пар с небольшой частью воды поступал через сборный коллектор в верхнюю часть парового коллектора. Другая же часть воды опускалась по верхним кипятильным трубкам в правые секционные коробки. Одновременно по этим же трубкам навстречу воде поднималось вверх небольшое количество паровых пузырьков, что несколько затормаживало скорость опускающейся воды в этих трубках.

Вода, попавшая таким образом в правые секционные коробки, вместе со вновь подведенной сюда водой из парового коллектора, снова поступала в нижние ряды кипятильных трубок, и круг циркуляции воды повторялся.

Выгодной особенностью этих котлов была возможность вынимать любую секцию трубок. Для этого требовалось снять верхний сборный коллектор и верхнюю часть кожуха котла.

Испытания котлов Уорда, установленных на «Monterey», произве-

денные инженером-механиком Лорингом, показали следующие результаты [1] (табл. 47):

Таблица 47

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Опытные данные
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	275,9
2	Площадь колосниковой решетки	R	»	6,85
3	Диаметр кипятильных трубок	$\frac{d_н}{d_{вн}}$	*мм*	48/42
4	Мощность котла	N_i	*и. л. с.*	1030
5	Паропроизводительность котла	D	*т/ч*	12,1
6	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2\ ч$	44
7	Сожжено стандартного угля в час	B	*кг/ч*	1840
8	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2\ ч$	269
9	Расход угля на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и. л. с. ч*	1,84
10	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*т*	13,85
11	Вес котла без воды	$G_к$	»	11,55
12	Вес котла без воды на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_к}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	11,3
13	Вес котла с водой на 1 *и. л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	»	13,84
14	Вес котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	$кг/м^2$	50
15	Вес котла на 1 *кг* пара	$\frac{G_к}{D}$	*кг/кг*	0,95
16	Температура питательной воды	$t_к$	°Ц	10
17	Температура пара	$t_п$	°Ц	100
18	Влажность пара	$1-x$	%	12,48
19	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	6,6
20	Ориентировочный к. п. д.	η	%	45

По данным испытания, к. п. д. рассматриваемого котла и испарительность топлива были весьма низкими, тогда как в котле Торникрофта, установленном на миноносце «Gushing», при весовом напряжении решетки $\frac{B}{R} = 196\ кг/м^2ч$ на 1 *кг* угля испарялось 7,53 *кг* пара, приведенного к 100° Ц при 3,9% содержания воды в нем.

[1] Journal of the American Society of naval engineers. Стр. 416, Washington, 1899; также стр. 115, 1898.

Невыгодной особенностью уордовских котлов являлась невозможность внутренней очистки труб.

Недостаточная циркуляция воды во всех выше рассмотренных котлах побудила некоторые котлостроительные заводы строить горизонально-водотрубные котлы с циркуляционными трубками.

Идея такого устройства котлов, вероятно, была позаимствована у Джоли (1857 г.).

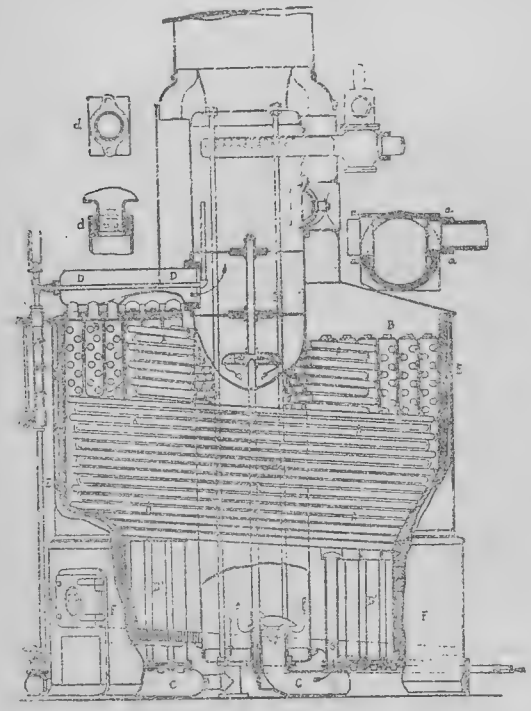


Рис. 146а. Котел Уорда для больших судов.

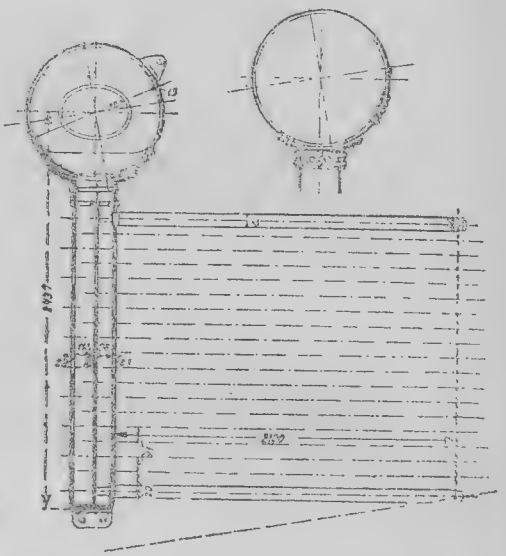


Рис. 147. Котел Вальтера.

КОТЛЫ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ТРУБКАМИ

108. Котлы Вальтера (Германия)

Принципиальная схема устройства котла Вальтера напоминала собой котел Миллера Г. А. (1869 г.). Он состоял из парового коллектора, водяной камеры, разделенной перегородкой на две половины, и кипятильных труб с помещенными внутри их циркуляционными трубками. Трубки эти для улучшения циркуляции были наклонены к горизонту под углом около 10°. Для избежания вырывания трубок из камеры, последние после развальцовки конической оправкой еще зажимались специальными накладками (рис. 147, 147 а).

Выходящие в камеру концы внутренних трубок снабжались фланцами, диаметр которых был несколько больше диаметра кипятильных труб.

На рис. 148 показано крепление внутренних трубок посредством накладок, прижимаемых к перегородке гайками на связях. Для сохранения концентрического положения внутренних трубок в кипятильной трубе на них надевались специальные кольца с упорами.

В табл. 48 приведены основные характеристики котла Вальтера.

Таблица 48

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	84
2	Площадь колосниковой решетки . . .	R	»	1,8
3	Топливо	—	—	пар- к. у.
4	Сожжено топлива в час	B	$кг/ч$	165
5	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2\ ч$	92
6	Часовая паропроизводительность котла (полагая $\Delta i = 540$ *кал/кг*)	D	$кг/ч$	1815
7	Стандартная паропроизводительность котла (полагая $\Delta i = 640$ *кал/кг*) . .	$D_с$	»	1530
8	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2\ ч$	21,6
9	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_с}{H_к}$	»	18,2
10	Видимая испарительность топлива . .	$И_в$	$кг/кг$	11,0

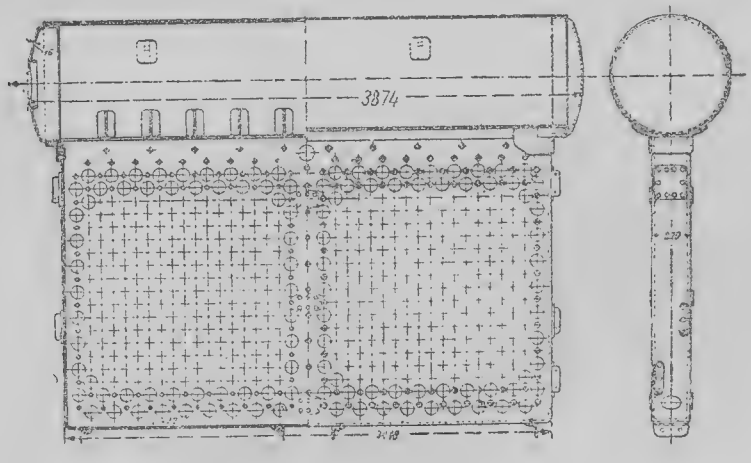


Рис. 147а. Котел Вальтера.

Образование пара и циркуляция воды в котлах Вальтера происходили так. Питательная вода опускалась из парового коллектора в переднюю половину камеры, а из нее распределялась по внутренним циркуляционным трубкам. Затем вода переходила в кольцевое пространство труб, где она частично испарялась. Пар, как более легкий, поднимался вверх, увлекая с собой воду. Выйдя из кольцевого пространства, пароводяная смесь поднималась по задней половине камеры в паровой коллектор, затем вода снова опускалась в переднюю половину камеры и т. д. Помимо улучшения циркуляции, котлы этого типа имели то преимущество, что их трубки, будучи развальцованы только в одной камере, получали возможность теплового рас-

ширения. Это устраняло появление течи в котле из-за несвободного расширения трубок.

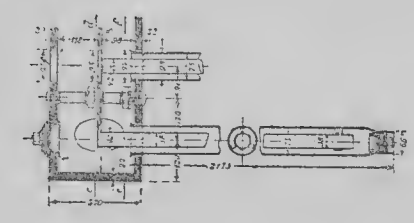
Одновременно новый тип котлов принес с собой и новые недостатки. Главные из них:

1) Невозможность внутренней очистки труб без выемки циркуляционных трубок, что доставляло много хлопот эксплоатационному персоналу.

2) Резкое утяжеление веса котла из-за наличия внутренних циркуляционных трубок.

3) Плохое качество сборки котла.

4) Сравнительно низкие $\frac{B}{R}$ и $\frac{D}{H_к}$.



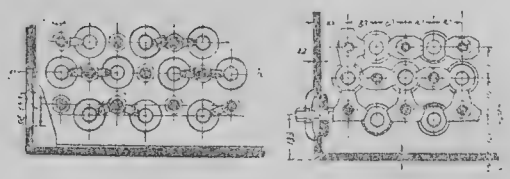


Рис. 148. Крепление трубок в котле Вальтера.

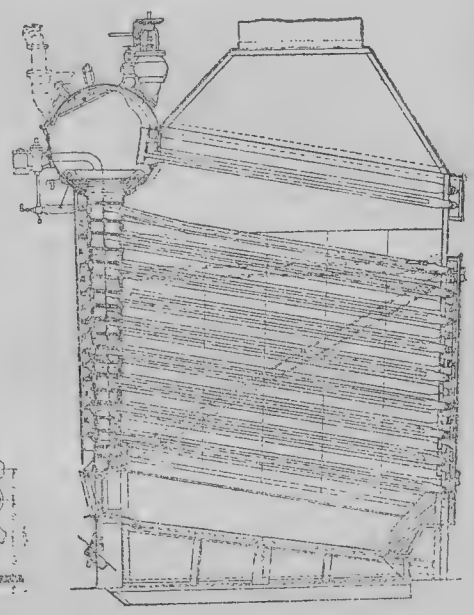


Рис. 149. Котел Дюрра 1883 г.

Все это привело к тому, что котлы Вальтера были забракованы. На смену им появились более совершенные котлы Дюрра.

109. Котлы Дюрра (Германия)

Котлы Дюрра[1] начали строить еще в 1883 г. Как видно из рис. 149, 150, дюрровские котлы отличались от котлов Вальтера тем, что кипятильные трубки в них крепились к камерам не перпендикулярно, как у вальтеровских котлов, а под углом примерно в 10°.

Внутренние трубки крепились к перегородке (рис. 151). Сзади трубки входили свободно в отверстие плиты, служащей для поддержания их. Поэтому они могли свободно расширяться. Задние концы труб закрывались специальными колпачками, которые можно было открывать на случай необходимого осмотра труб (рис. 151).

[1] VDI. Стр. 1170, 1896; TINA. Стр. 296—308, 1894; Нем. пат. № 29087, 1883 г.; № 39018, 1886 г.; № 46430, 1888 г.; № 60920, 1891 г. Англ. пат. № 12060, 1888 г.; № 14745, 1893 г. Русс. пат. № 5615, 1896 г.

Непосредственно в паровой коллектор ввальцовывались еще два ряда труб, служащих для осушения пара (рис. 149). Пар из парового коллектора поступал во внутренние трубки пароосушителя. Затем пар переходил в кольцевое пространство, откуда, осушившись за счет теплоты дымовых газов, он выходил по специальной выгородке из парового коллектора в паропровод. Генерация пара и циркуляция воды в рассматриваемых котлах происходили так же, как и у котлов Вальтера.

Показанный на рис. 149—150 котел Дюрра[1] имел поверхность нагрева котла 223 *м*²; площадь решетки — 5 *м*².

Вес котла без воды составлял 20,7 *т*, с водой 25,3 *т*. Давление пара в котле было равно 15 *ати*.

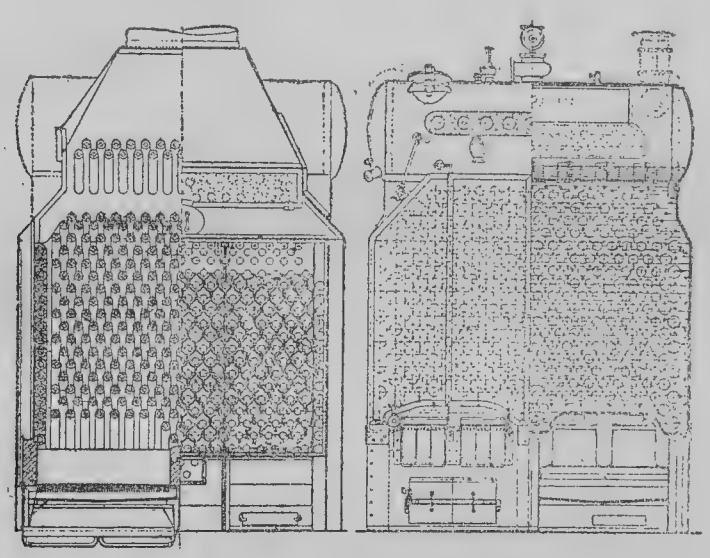


Рис. 150. Котел Дюрра 1883 г.

Результаты испытаний котла Дюрра показали, что, при сжигании на 1 *м*² площади решетки 234 *кг* стандартного угля, каждый килограмм угля испарял 7,35 *кг* пара. Котел снабжал паром машину мощностью в 800 *и. л. с.*, т. е. на 1 *т* веса котла с водой приходилось приблизительно 30 *и. л. с.* Часовая паропроизводительность котла составляла около 8250 *кг*, т. е. с каждого *м*² поверхности нагрева котла снималось за час около 37 *кг* пара.

После опытов котел Дюрра был несколько изменен. В 1897 г. котлы Дюрра измененной конструкции (рис. 152) были поставлены на германский броненосец «Baden». Кипятильные трубки в этом котле крепились уже не наклонно, как раньше, а перпендикулярно, так как косая развальцовка труб выявила в эксплоатации меньшую прочность соединения.

Новая конструкция котла была снабжена перегревателями пара, расположенными у основания дымовой трубы.

Прямая развальцовка труб требовала большей площади для размещения котла и вызывала дополнительные напряжения в камерах.

[1] C. Busley. Die jungsten Bestrebungen und Erfolge des deutschen Schiffbaues. S. 41, Berlin, 1895.

Позже Дюрр опять вернулся к прежней форме крепления трубок, только усовершенствовал способ их соединений.

Последние котлы Дюрра выгодно отличались от первых тем, что их водяные камеры имели грязевики. Кроме того, колпачки для закрывания задних концов трубок выполнялись значительно проще.

Эксплоатационные наблюдения над работой котлов Дюрра показали, что они работали вполне надежно при паронапряжении поверхности нагрева котла, равном 37 *кг/м²ч*.

Такое паронапряжение считалось тогда хорошим, поэтому котлы Дюрра получили широкое распространение, особенно в военном флоте Германии и Англии (табл. 49).

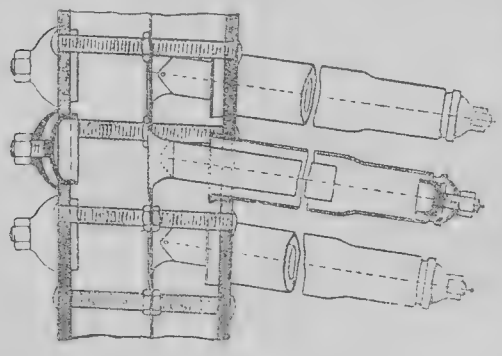


Рис. 151. Водяная камера и трубки котла Дюрра.

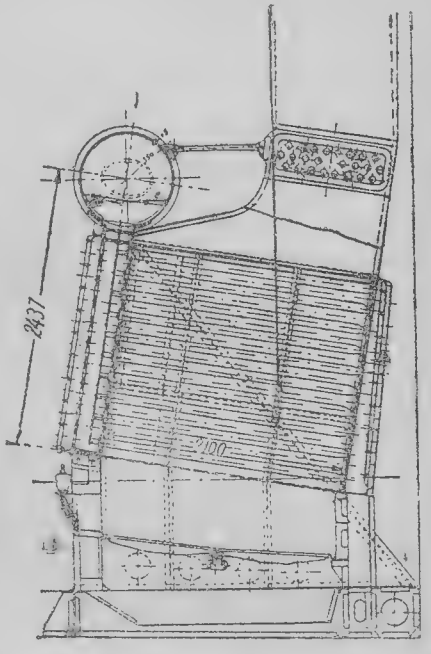


Рис. 152. Котел Дюрра на германских броненосцах.

Таблица 49

Число котлов Дюрра, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. включительно

№№ пор.	Наименование стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами, в *и. л. с.*
1	Германия	6	62	50 000
2	Великобритания	1	12	10 000
3	Австро-Венгрия	2	8	4 000
		9	82	64 000

119. Котлы Колле (Франция)

Котлы системы Колле[1], патентованные в 1878 г., состояли из нескольких волнистых водяных камер, похожих на камеры котлов Бабкока и Вилькокса. Это позволило производить крепление кипятильных труб в шахматном порядке. Крепление труб к камере (рис. 153)

[1] Girard. Chaudières marines. Стр. 184, Paris, 1897.

осуществлялось с помощью болтовых связей. Преимуществом данного котла по сравнению с другими ему подобными нужно считать замену одной камеры несколькими секциями.

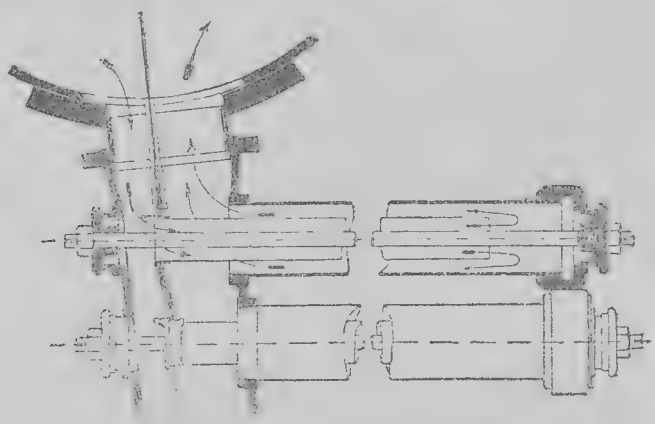


Рис. 153. Расположение трубок в котле Колле.

Однако, разборка труб в котле Колле представляла большие затруднения, что было их крупным недостатком.

Котлы Колле строились, главным образом, для паровых катеров. Когда котельный завод Колле перешел в руки Никлосса, последний усовершенствовал котлы по линии более легкой разбираемости труб. Высокая техническая мощность заводов Никлосса дала возможность настолько хорошо освоить производство котлов типа Колле, что они получили весьма широкое распространение под новым названием котлов Никлосса. Этот случай довольно характерный для капиталистического общества, когда крупные заводчики покупали у изобретателей патент иногда вместе с их маленькими заводами.

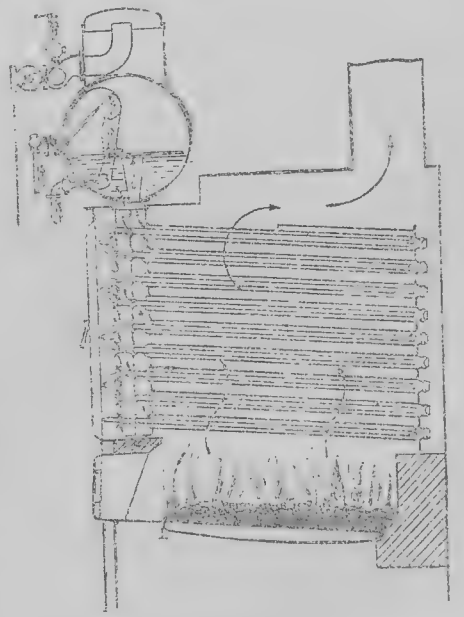


Рис. 154. Котел Никлосса.

111. Котлы Никлосса (Франция)

Запатентованные в 1891 г. котлы Никлосса[1] состояли из отдельных секций (рис. 154—154 а). По своему устройству котлы Никлосса отличались от котлов Колле лишь своеобразным креплением труб в камерах (рис. 155). Трубки котла крепились к водяным камерам не перпендикулярно, а под углом (рис. 154). Внизу камеры соединялись между собой общим коллектором, служившим для продувания их.

[1] VDI. Стр. 1172—1175, 1896. TINA. Стр. 296—308, 1894. TINA. Стр. 267—292, 1896. Нем. пат. № 114981, 1898 г. Русск. пат. № 379, 1894 г. Англ. пат. № 1052, 1891 г.

Генерация пара и циркуляция воды в котле происходили так. Питательная вода (рис. 154 b) поступала по трубке *AK* в особое отделение парового коллектора. В этой выгородке вода, нагреваясь, дегазировалась. Здесь же из воды могли выделяться механические примеси.

Далее вода переливалась в следующее отделение коллектора, а из него уже распределялась по секциям. Из каждой секции через специальные вырезы вода входила во внутренние трубки (рис. 155). Пройдя циркуляционные трубки, вода попадала в кольцевое пространство между трубками. Образовавшаяся здесь пароводяная смесь выходила из кольцевого пространства в камеру через прорезы, сделанные в наружных трубках. Затем вода направлялась в паровой коллектор по задней половине камеры. После этого цикл движения воды и пара повторялся снова.

Проведенные в марте 1895 г. пробные испытания котлов Ник-

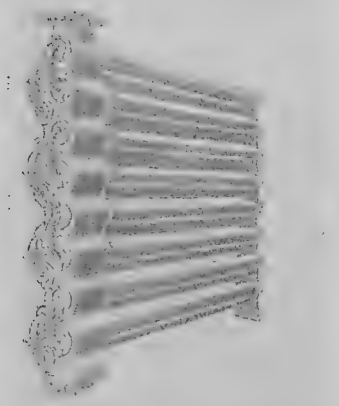


Рис. 154a. Секция котла Никлосса.

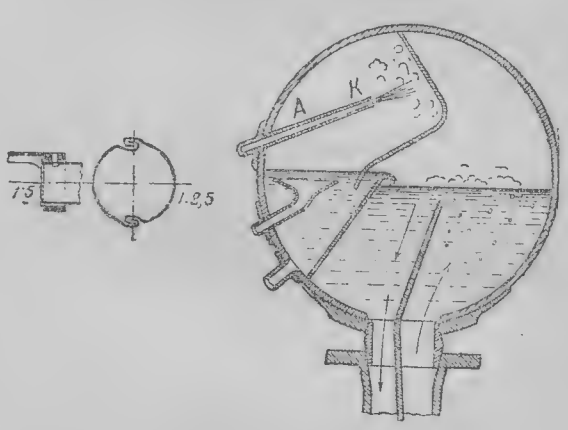


Рис. 154b. Паросушитель и внутренняя трубка котла Никлосса.

лосса, установленных на французском крейсере «Friant», дали следующие результаты.

При полной нагрузке котлы развивали мощность 9438 *и. л. с.*, при этом на 1 $м^2$ решетки сжигали 118 *кг* стандартного угля в течение часа, а часовой расход угля, отнесенный к 1 *и. л. с.*, составлял 0,911 *кг/и. л. с. ч.*

Отношение развиваемой мощности к весу 20 котлов (равному 319 *т*) при максимальной нагрузке их составляло всего 29,6 *и. л. с.*, т. е. только немногим больше, чем такое же отношение у шотландских котлов [1].

При понижении весового напряжения решетки до 89 *кг/$м^2$ч* расход угля на 1 *и. л. с. ч* был уменьшен до 0,889. При больших же форсировках в котлах Никлосса весовое напряжение решетки удавалось доводить до 175 *кг/$м^2$ч*.

Основным преимуществом котлов Никлосса надо считать:

1) возможность устранения большого числа неисправностей с передней стороны котла,

[1] Brevet Niclausse. Générateur inexplosible. Paris. 1896.

2) легкость и быстроту разборки труб (в течение нескольких минут),

3) возможность свободного расширения трубок.

Наряду с этим котлы Никлосса имели и ряд больших недостатков:

1) трудность внутренней очистки наружных и внутренних трубок (для очистки труб их надо было предварительно вынимать из камер, что требовало наличия свободного пространства),

3) частые аварии котлов с человеческими жертвами,

4) вырывание наружных труб из камер,

5) утяжеление веса за счет внутренних труб, почти не получающих тепловой нагрузки,

6) применение ковкого чугуна для укрепления внутренних труб в камере,

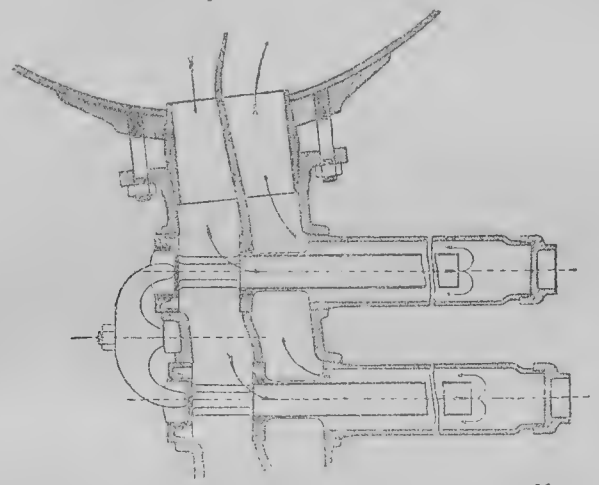


Рис. 155. Водяная камера и кипятильные трубки котла Никлосса.

7) невозможность продувания кипятильных труб (наиболее серьезный недостаток).

Но, несмотря на все эти недостатки, котлы Никлосса давали лучшие эксплоатационные характеристики, чем многие водотрубные котлы конца XIX в., поэтому они продержались в военном флоте до начала XX в. (см. табл. 50).

Таблица 50

Число котлов Никлосса, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. вкл.

№ по пор.	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	Франция	10	176	116 000
2	Япония	7	112	78 000
3	Россия	3	62	39 000
4	Великобритания	1	8	4 000
5	Италия	1	24	14 000
		22	382	251 000

КОТЛЫ МИЙАБАРА (ЯПОНИЯ)

Как показали эксплоатационные наблюдения, из всех выше рассмотренных камерных котлов наиболее жизненными оказались котлы Бабкока и Вилькокса.

Основные недостатки последних были в значительной мере изжиты лишь в 1895 г. в котле инженера-механика японского военного флота контр-адмирала Мийабара [1].

Как известно, к концу XIX в. Япония начала усиленно вооружаться. С 1885 г. она стала приобретать в Англии и Франции новые военные суда усовершенствованного типа. Одновременно, в Японии развертывается собственное судостроение. Для руководства этой работой в Японии был приглашен в качестве главного корабельного инженера флота французский первоклассный инженер Бертин (Bertin), под руководством которого японское судостроение пошло быстро вперед и достигло поразительных результатов. Большой толчок этому развитию дала японо-китайская война 1894—1895 гг., бывшая первым шагом к превращению Японии в империалистическую державу.

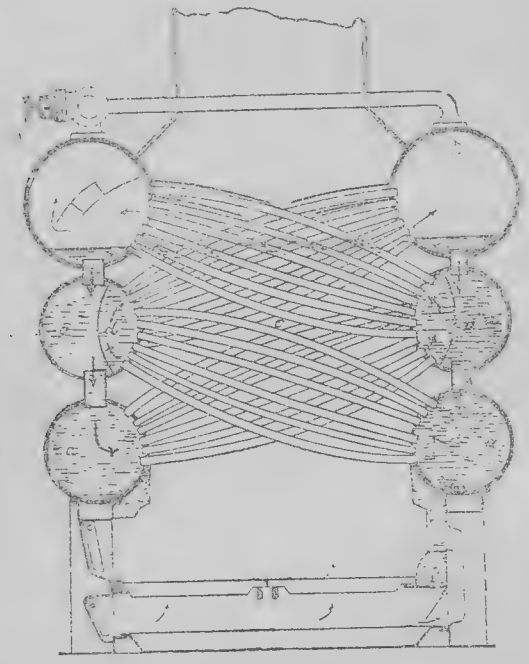


Рис. 156. Котел Мийабара.

Стремительное развитие японского военного флота было вызвано желанием поскорее занять одно из первенствующих мест на Дальнем Востоке.

Вступая в борьбу за Дальний Восток с другими заинтересованными в нем государствами, Япония старалась освободить себя от иностранной зависимости. Для этого почти все элементы военного судостроения Япония начала производить у себя. В частности, большая работа была проведена по освоению производства и эксплоатации котлов Мийабара.

Этот котел отличался большим числом коллекторов (рис. 156), а именно в нем имелось от двух до трех паровых и четыре водяных коллектора. Двумя пучками слегка изогнутых труб каждый второй снизу коллектор соединялся с первым и третьим лежащими на противоположной стороне коллекторами. Трубы укреплялись в стенках коллекторов развальцовкой. Наружный диаметр кипятильных трубок был принят равным 51 *мм*.

Все три коллектора спереди и сзади соединялись между собой короткими циркуляционными трубами большого диаметра, поста-

[1] Dietrich. Der moderne Dampfkessel der Kriegs- und Handelschiffe. Стр. 490—494. Rostock, 1908. Англ. пат. № 9133, 1896 г., № 12239, 1901 г.

вленными на резьбе. Иногда сверху котла ставился седьмой коллектор — паросборник, соединяемый трубками с двумя верхними коллекторами (рис. 157).

Для возможности замены кипятильных трубок, а также для очистки их от накипи, на передних коллекторах имелось по одному или по два ряда отверстий, закрываемых такими же крышками, как и у котлов Бабкока и Вилькокса.

Выгодной особенностью котла Мийабара было наличие в нем грязевика, соединяющегося трубами с нижними коллекторами.

В начале XX в. в соответствии с общей тенденцией к концентрации мощности в отдельных агрегатах котлы Мийабара также начали делать двойными, при этом вторая половина котла располагалась вправо от оси *ab* (рис. 157) симметрично первой половине.

В этом случае котел имел девять коллекторов, кроме устанавливаемого иногда паросборника.

Путь циркуляции воды и пара в данном котле показан на рис. 156 стрелками. Питание котла водой производилось в нижние коллекторы. Такой способ питания выгоден, так как при нем скорость опускающейся воды в вертикальных циркуляционных трубках будет меньше, и поэтому уменьшатся и гидравлические сопротивления, а стало быть, улучшится циркуляция.

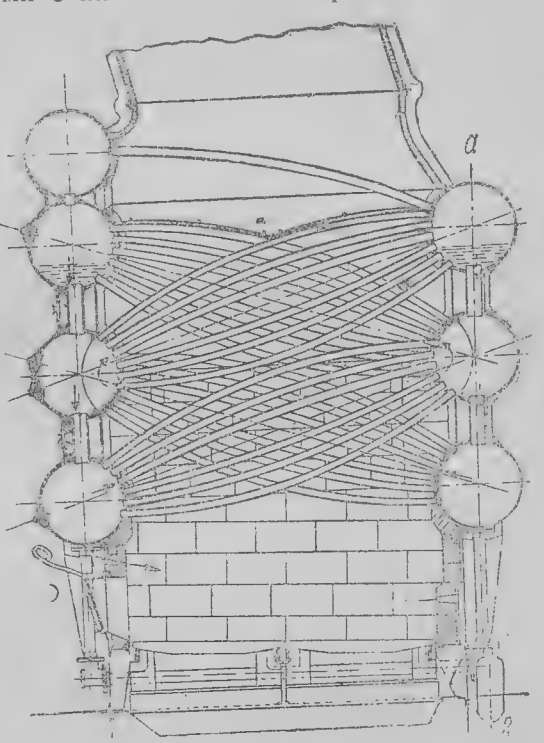


Рис. 157. Котел Мийабара с 7 коллекторами.

Это преимущество могло вызвать и недостаток, а именно при температуре воды ниже 70° Ц не исключалась возможность коррозии стенок котла воздухом, если вода предварительно не освобождалась от воздуха.

Для сравнительной оценки котлов Мийабара приводим важнейшие средние эксплоатационные данные котлов Бабкока и Вилькокса и Мийабара (табл. 51).

Данные таблицы указывают на большие преимущества котлов Мийабара в сравнении с котлами Бабкока и Вилькокса, особенно в отношении веса котла и развиваемой мощности, отнесенной к 1 $м^2$ решетки. Кроме того, у котлов Мийабара были улучшены как циркуляция воды, так и возможность свободного расширения кипятильных трубок.

Одновременно с этим котлы Мийабара сохранили важнейшие преимущества котлов Бабкока и Вилькокса: полную взаимозаменяемость отдельных частей котла.

В Японии в начале XX в. котлы Мийабара ставили на все вновь строящиеся линкоры. Помимо этого, ими заменялись котлы Бельвиля, если последние требовали капитального ремонта.

Таблица 51

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов	
				1	2
1	Тип котла			B и W	Мийабара
2	Отношение поверхности нагрева к площади решетки	$\frac{H}{R}$	$м^2/м^2$	39	35
3	Вес котла с арматурой и гарнитурой, отнесенный к *и. л. с.*	$\frac{G_к}{N_i}$	*кг/и. л. с.*	42	20
4	Развиваемая мощность, отнесенная к 1 $м^2$ решетки . .	$\frac{N_i}{R}$	*и. л. с./м²*	123	182
5	Давление воздуха в закрытую котельную	$\Delta S_к$	*мм* вод. ст.	50	18

Такое большое распространение котлов Мийабара объяснялось еще и тем, что большое число коллекторов, увеличивающих общий вес котла, не имело в то время большого значения.

Из всех секционных котлов и котлов с циркуляционными трубами большое распространение получили лишь котлы Бабкока и Вилькокса, Мийабара и Никлосса.

Тем не менее основные преимущества секционных котлов и котлов с циркуляционными трубами, как-то: 1) эластичность отдельных элементов котла, 2) легкость его разборки, 3) применение кипятильных труб малых диаметров, 4) стандартность производства отдельных элементов котла, были использованы при разработке и проектировании последующих конструкций котлов.

КОТЛЫ ТРЕУГОЛЬНОГО ТИПА

Во всех предыдущих конструкциях котлов на разводку пара затрачивалось не менее 1 часа. Это объяснялось их недостаточной эластичностью. Котлостроительные заводы при конструировании новых котлов треугольного типа главное внимание уделяли улучшению эластичности кипятильных трубок и циркуляции воды в них.

Улучшение эластичности достигалось путем применения изогнутых кипятильных труб.

112. Котлы с циркуляционными трубами Герни и Сошэ

Необогреваемые циркуляционные трубы впервые были применены еще в 1825 г. в паровозном котле Герни (Guerney) [1], а не Дю-Тамплем в 80-е гг. XIX в., как пишут многие авторы и, в частности, Буслей [2].

В том же 1825 г. Жозеф Эйве разработал проект секционного водотрубного котла с двумя циркуляционными трубами, не обогреваемыми газами.

Из рис. 158 ясно видно устройство котла Герни. Основным недостатком данного котла является весьма низкий к. п. д. из-за чрезвычайно малой поверхности нагрева котла.

---

[1] Dietrich. Der moderne Dampfkessel. Стр. 31, Rostock, 1908.

[2] Busley. Die Schiffsmaschine. T. I, стр. 620, 1901. То же см. VDI, стр. 1175, 1896.

Котел Герни был значительно усовершенствован лишь в 1859 г. Сошэ (Sochet) (рис. 159). Как и в конструкции Герни, здесь была применена циркуляционная труба. Усиление циркуляции воды достигалось также расположением кипятильных трубок под небольшим углом к горизонту. Это облегчало подъем паровых пузырьков в паровой коллектор.

Основной недостаток котла Герни — низкий к. п. д. — был уменьшен Сошэ до минимума путем понижения температуры уходящих газов и значительного развития конвекционной поверхности нагрева.

Котлы Герни и Сошэ явились прототипом первой конструкции котлов Дю-Тампля.

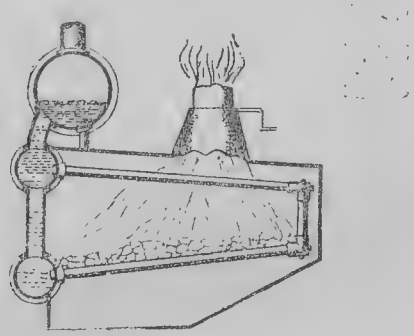


Рис. 158. Котел Guerney 1825 г.

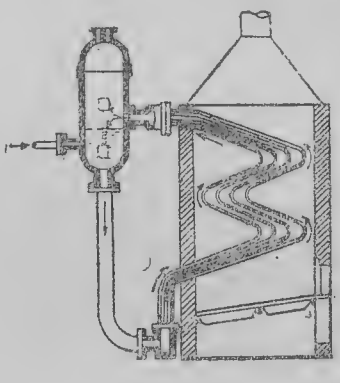


Рис. 159. Котел Sochet.

113. Котлы Дю-Тампля (Франция)

На рис. 160 показан котел Дю-Тампля[1], испытанный впервые в 80-х гг. XIX в. на французских миноносцах. Котел состоял из одного парового и двух водяных чугунных коллекторов квадратного сечения. Паровой коллектор соединялся с водяными коллекторами посредством четырех рядов кипятильных трубок. Увеличения поверхности нагрева котла Дю-Тампля достигал удлинением кипятильных трубок. Для уменьшения высоты котла кипятильные трубки были согнуты зигзагообразно.

Чтобы облегчить продвижение пароводяной смеси в паровой коллектор, кипятильные трубки имели небольшой уклон кверху по всей их длине. Из парового коллектора вода спускалась в водяные коллекторы по циркуляционным трубам. Из водяных коллекторов вода распределялась по кипятильным трубкам и двигалась по ним вверх, частично превращаясь по пути в пар.

Пароводяная смесь из кипятильных трубок входила в паровой коллектор. Пар, проходя через слой воды, частично осушался, а вода снова поступала в водяные коллекторы по циркуляционным трубкам и т. д. Такое круговое движение выделенного объема воды продолжалось до полного его испарения.

Остающиеся после испарения воды посторонние примеси могли через известные промежутки времени удаляться из коллекторов по продувательным трубам, расположенным сзади котла.

[1] VDI. Стр. 1175, 1896; TINA. Стр. 86—112, 1894; Révue industrielle. Стр. 5, 5/I 1889. Нем. пат. № 56128, 1890 г.; № 99876, 1897 г. Англ. пат. № 2003, 1876 г.; № 518, 1891 г.; № 17200, 1895 г.; №№ 17264, 17265, 1896 г. Русск. пат. № 1130, 1895 г., № 3604, 1897 г.

Выгодной особенностью котла Дю-Тампля является возможность быстрой его разводки (45 минут с холодного состояния), что объясняется относительно небольшим весом воды в котле по сравнению с поверхностью его нагрева.

Другим преимуществом можно считать постановку циркуляционных труб, дающих улучшение циркуляции воды в котле.

Третье важное преимущество котлов Дю-Тампля — свободное тепловое расширение кипятильных труб, чего не было у двухкамерных котлов.

Последнее преимущество котла Дю-Тампля вызвало и ряд недостатков. Благодаря большой длине трубок, небольшому их диаметру и крутым изгибам, гидравлические сопротивления движению пароводяной смеси получались очень большими. Расстояние же по вертикали между паровым и водяным коллекторами котла было небольшим, и напор воды для преодоления гидравлического сопротивления в циркуляционных трубах оказывался совершенно недостаточным. В результате слабой циркуляции воды у котлов Дю-Тампля имели место частые пережоги труб, особенно в их нижних коленах.

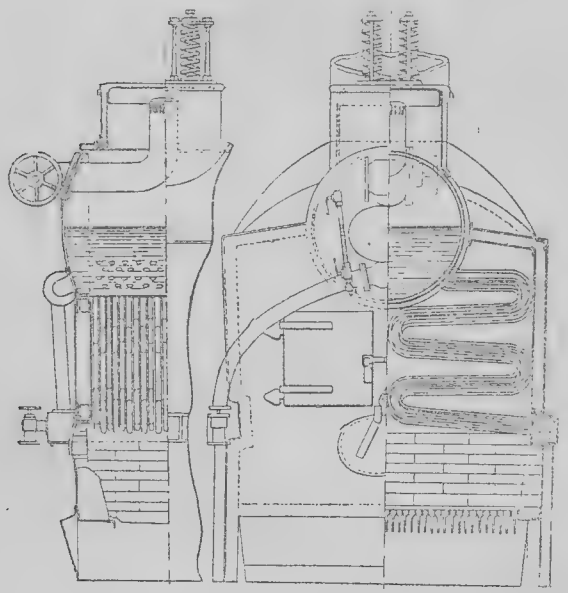


Рис. 160. Первая конструкция котла Дю-Тампля.

Крутой изгиб кипятильных трубок в этих котлах не позволял производить их внутреннюю очистку, что опять-таки являлось одной из причин частого пережога трубок.

Из других не менее важных недостатков этих котлов следует указать на применение чугунных водяных коллекторов и небольшую высоту топки. Благодаря малой высоте топки, горение в ней не заканчивалось, а продолжалось и в конвекционном пучке труб. Очень часто языки пламени даже выходили из дымовой трубы. Такие явления для котлов эсминцев были совершенно недопустимы.

Позднее Дю-Тампль в новой конструкции своего котла частично учел эти недостатки (рис. 161), а именно водяные коллекторы были уже выполнены из стали и цилиндрическими. Также была изменена форма изгиба трубок. Последняя позволяла уменьшить гидравлические сопротивления движению воды в них и увеличить высоту топки, отчего улучшался процесс горения в ней.

Как видно из рис. 161, трубки выходили из правого водяного коллектора и входили в левую половину парового коллектора, и, наоборот, трубки от левого водяного коллектора входили в правую половину парового коллектора. Получалось крестообразное расположение трубок, хорошо защищавшее паровой коллектор от действия высоких температур газов.

Дю-Тампль почти все состояние израсходовал на разработку своих котлов. Он даже думал ставить их на самолеты, приводимые в движение паровой машиной. Но опыты с его самолетом не дали удовлетворительных результатов[1].

В 90-х годах котлы Дю-Тампля были усовершенствованы инженером Норманом. Эти усовершенствования шли по линии увеличения

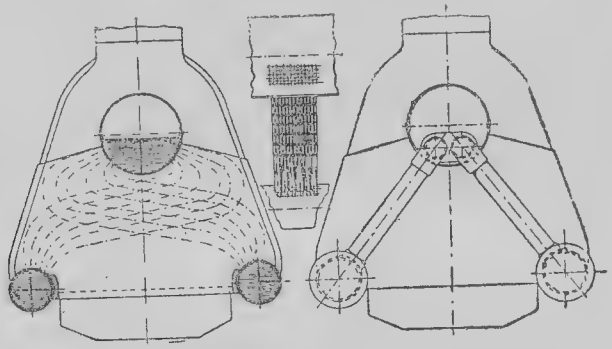


Рис. 161. Котел Дю-Тампля с перекрещивающимися трубками.

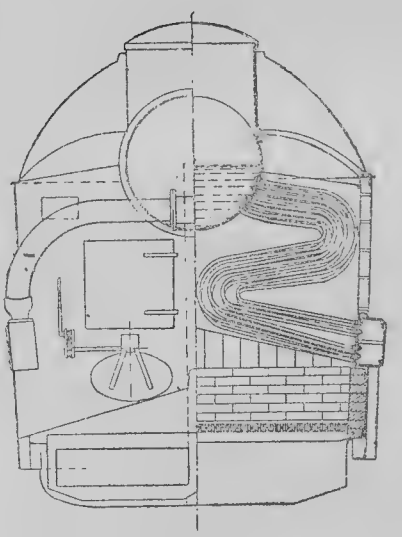


Рис. 162. 3-коленчатый котел Дю-Тампля.

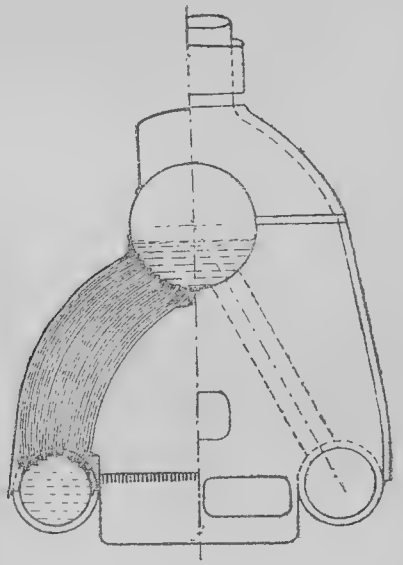


Рис. 163. Новейшая форма котлов Дю-Тампля (тип Дю-Тампля—Гюйо).

диаметра трубок и упрощения их зигзагообразной формы. Для группы французских эсминцев трубки в первом нижнем колене имели диаметр 19 *мм*, а в последующих четырех коленах диаметр трубок составлял 23,8 *мм*. Предполагалось, что увеличение диаметра трубок в верхней их части должно улучшить циркуляцию воды. Как показали эксплоатационные наблюдения, это мероприятие заметных результа-

[1] Морские офицеры братья Дю-Тампль получили патент на аэроплан (типа моноплана) 2 мая 1857 г. за № 32031. Более 20 лет затратили они на попытки осуществления гигантского аэроплана с паровым двигателем, но потерпели неудачу. (*Прим. ред.*).

тов не дало, но сильно усложнило производство трубок разного диаметра по длине. В дальнейшем кипятильные трубки вновь начали делать одинакового диаметра.

Циркуляцию воды в котле пытались улучшить путем изгиба кипятильных трубок не на пять, а на три колена (рис. 162). Такие котлы были поставлены до 1896 г. на многих французских и русских миноносцах.

С конца 90-х гг. XIX ст. фирма Дю-Тампль совсем отказалась от зигзагообразного изгиба кипятильных трубок. Трубки котла начали изгибать по большему радиусу (рис. 163).

Два ряда труб, обращенные к топке, смещались в одну плоскость, а остающиеся просветы у парового коллектора заполнялись огнеупорным кирпичом или асбестом. Получалась газонепроницаемая перегородка, идущая с фронта котла примерно на $^2/_3$ или $^3/_4$ длины топки. Такая перегородка заставляла газы, образовавшиеся в топке, двигаться в конец ее. Там они входили в конвекционный пучок труб и, поворачиваясь, двигались по нему к фронту котла, откуда уходили в дымоход. Позднее для образования газонепроницаемой стенки начали применять трубки особого профиля (рис. 164).

Такое устройство газохода, вероятно, впервые было предложено инженером-механиком Гюйо. Поэтому данная конструкция котлов носит название котлов Дю-Тампль — Гюйо.

Таблица 52

Основные характеристики котла Дю-Тампля—Гюйо, установленного на французском миноносце № 66

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Дата испытания			27/I 1895
2	Продолжительность испытания	Z	час.	2
3	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	107,93
4	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	$кг$	9550
5	Давление в котле	$P_к$	$ати$	9
6	Давление воздуха в котельной	$\Delta S_{к-й}$	$мм$ вод. ст.	60
7	Часовой расход нефти	B	$кг/ч$	365
8	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2\ ч$	38
9	Паропроизводительность котла	D	$кг/ч$	4130
10	Испарительность топлива	$И_в$	$кг/кг$	11,3
11	Вес котла на 1 $т$ пара	$\frac{G_к}{D}$	$кг/т$	2300

В табл. 52 и 53 приведены основные характеристики котлов Дю-Тампля. По данным таблицы, котлы Дю-Тампля давали сравнительно высокие $\frac{D}{H_к}$ и $\frac{B}{R}$. Вес котлов на 1 $т$ пара получался небольшим.

Таблица 53

№ по порядку	Наименование	Обозначение	Размерность	Французские миноносцы №			
				87	60	130	147
				Котлы Дю-Тампля			
				Четырехколенчатые			Двухколенчатые
1	Дата испытания			7/X 1889	7/V 1895	10/VIII 1891	15/VII 1892
2	Продолжительность испытания	Z	час	2	2	3	3
3	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	80	84,5	159,65	177
4	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	$кг$	6 830	7300	12 570	11 876
5	Давление в котле	$P_к$	$ати$	8,5	13	9,25	14
6	Давление воздуха в котельной	$\Delta S_{к-й}$	$мм$ вод. ст.	100	75	48	75
7	Часовой расход топлива	B	$кг/ч$	6 400	700	880	1 180
8	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2\ ч$	250	267	187	268
9	Паропроизводительность котла	D	$кг/ч$	4 100	4200	6 896	8 515
10	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2\ ч$	51,2	50	43	48
11	Испарительность топлива	$И_в$	$кг/кг$	6,4	6,05	7,77	7,21
12	Вес котла на тонну пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	$кг/т$	1 670	1730	1 840	1 390

Котлы Дю-Тампля — Гюйо давали несколько худшие характеристики $\frac{D}{H_к}$, $\frac{G_{к+в}}{D}$, хотя у них условия для циркуляции воды были

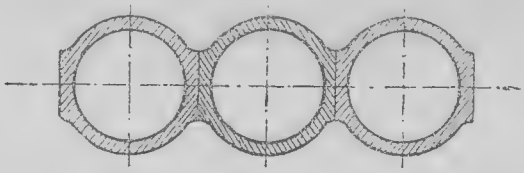


Рис. 164. Форма поперечного сечения трубок для образования газонепроницаемой перегородки в котлах Дю-Тампля.

лучше. Это можно объяснить тем, что технические средства сжигания нефти в то время не позволяли повысить тепловое напряжение топки до предела, ограничиваемого паропроизводительностью котла (котел недогружался).

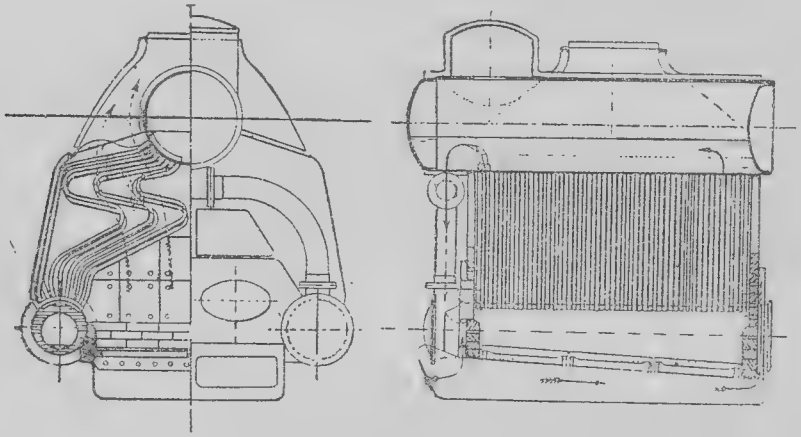


Рис. 165. Котел Дю-Тампля.

В табл. 54 приведены характеристики одного из серии котлов Дю-Тампля (рис. 165), строившихся в 1901 г. для французских миноносцев.

Таблица 54

Давление пара в котле	16,0 *ати*
Поверхность нагрева котла	110 $м^2$
Площадь колосниковой решетки	2,38 $м^2$
Наружный диаметр труб	2[illegible]6 *мм*
Толщина стенок труб	2,5 *мм*
Вес котла с принадлежностями и дымовой трубой	6,3 [illegible]
Вес воды в нем	1,[illegible] [illegible]

Котлы Дю-Тампля в конце XIX в. получили большое распространение в военных флотах различных стран (табл. 55).

Таблица 55

Число котлов Дю-Тампля, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. включительно

№ по пор.	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	Франция	11	90	68 000
2	Великобритания . .	2	12	8 000
3	США	5	12	11 000
		18	114	87 000

114. Котлы Нормана (Франция)

Большую работу по усовершенствованию котлов Дю-Тампля провел Норман [1]. Котел конструкции Нормана 1894 г. состоял из парового и двух водяных коллекторов, а также кипятильных трубок (рис. 166—166а). Паровой коллектор соединялся с водяными коллекторами двумя пучками труб.

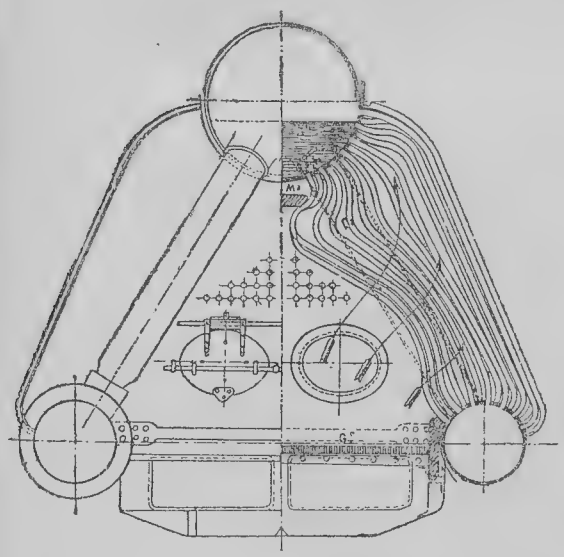


Рис. 166. Котел Нормана.

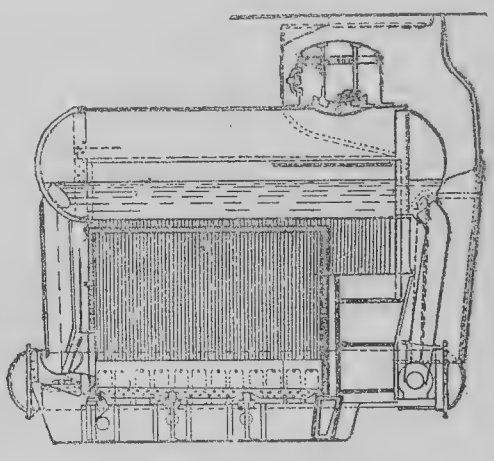


Рис. 166а. Котел Нормана.

Передние ряды труб имели специальную форму изгиба, которая позволила Норману значительно увеличить высоту и объем топки и тем самым улучшить процесс горения в топочном пространстве.

Такой изгиб трубок позволял защитить паровой коллектор от действия высоких температур топочных газов посредством кирпичной перегородки, положенной на трубки.

[1] The Engineer. T. II, стр. 46, 1892; VDI. Стр. 1176, 1177, 1896. Англ. пат. № 25004, 1894 г.; № 2315, 1894 г. Нем. пат. № 82800, 1894 г. Русск. пат. № 1145, 1894 г.

Для улучшения циркуляции воды в котле паровой коллектор соединялся с двумя водяными коллекторами двумя парами циркуляционных труб, расположенных спереди и сзади котла.

Циркуляция воды в котле и процесс генерации пара происходили здесь так же, как и у котлов Дю-Тампля.

Топочные газы входили в пучок труб только спереди топки, задняя же часть передних двух рядов кипятильных труб образовывала собой газонепроницаемую перегородку (рис. 166).

Войдя в газоход, газы двигались в нем вдоль топки горизонтально и попадали в дымоход, расположенный сзади котла.

Котлы Нормана[1] почти всегда снабжались поверхностным подогревателем питательной воды, в котором она нагревалась до 115° Ц паром, отработанным в цилиндре высокого давления.

Котлы Нормана в данном конструктивном оформлении строились в 90-х гг. прошлого столетия, главным образом, для французских миноносцев и для английских минных крейсеров.

Приведем наиболее важные результаты испытания котла Нормана, установленного на французском миноносце № 185 (табл. 56).

Таблица 56

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Эсминец № 149	Эсминец № 185
1	Площадь колосниковой решетки	R	$м^2$	3,35	3,61
2	Поверхность нагрева котла . .	$H_к$	„	—	171
3	Вес котла	$G_к$	$т$	9,6	10,6
4	Вес воды в котле	$G_в$	„	—	2,7
5	Давление в котле	$P_к$	*ати*	12,5	14
6	Мощность машин	N_i	*и. л. с.*	1332	1680[2]
7	Весовое напряжение решетки .	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2\,ч$	340	327
8	Мощность, отнесенная к 1 $т$ веса котла	$\frac{N_i}{G_к}$	*и. л. с./т*	140	158
9	Температура воды, поступающей в котел	$t'_к$	°Ц	—	116
10	Мощность на 1 $м^2$ решетки . .	$\frac{N_i}{H_к}$	*и. л. с./м²*	400	—
11	Давление воздуха в зольнике .	ΔS	*мм* вод. ст.	—	89
12	Температура уходящих газов .	$t_{ух}$	°Ц	—	340
13	Диаметр кипятильных трубок .	$d_{вн}\|d_н$	*мм*		25/30

Как показывает таблица, замечательной особенностью котла Нормана было чрезмерно большое отношение мощности машины к весу котла. Обращает на себя внимание и очень большое количество

[1] Transactions of the institution of naval architects. Стр. 34, 1895.
[2] Мощность приведена для максимальной нагрузки.

тепла, снимаемое с 1 $м^2$ колосниковой решетки, а именно, по данным опытов $\frac{Q}{R}$ составляло примерно 2 500 000 *кал/м²ч*. Такой величины даже в настоящее время не удается достигнуть на самых лучших механических решетках в стационарных установках.

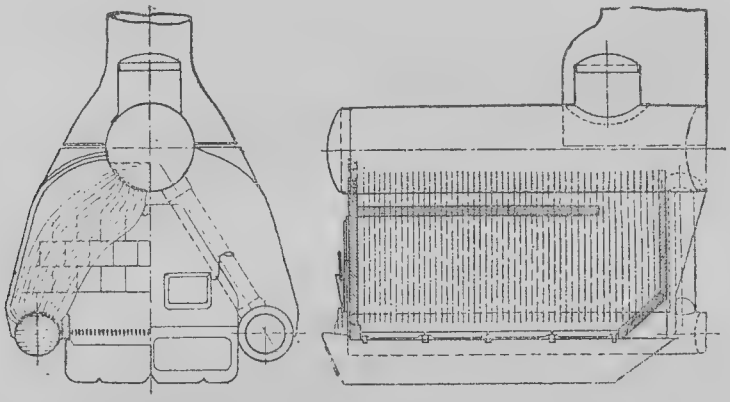


Рис. 167. Котел Нормана типа 1901 г.

Выгодной особенностью котлов Нормана являлся нормальный ввод кипятильных трубок в коллекторы, что придавало котлу большую эластичность; из-за этого редко появлялись течи даже в местах присоединения к коллекторам прямых циркуляционных труб.

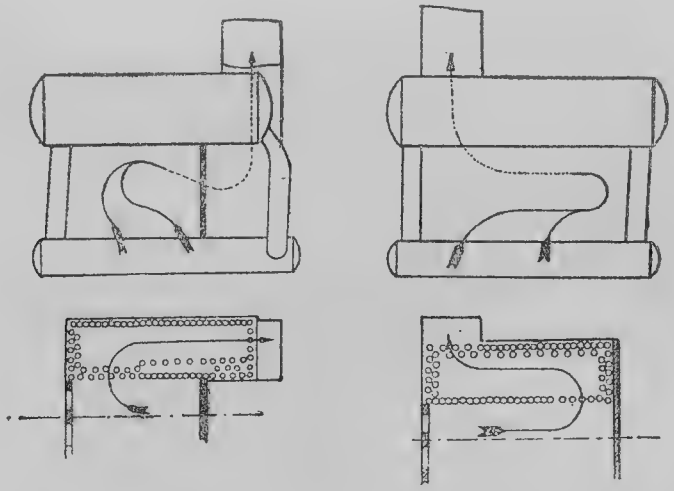


Рис. 168 a. Рис. 168 b.
Две системы устройства дымоходов в котле Нормана.

Недостатком котла являлась невозможность производить внутреннюю очистку кипятильных труб, работающих в наиболее тяжелых термических напряжениях. В более поздних конструкциях Норман учел этот недостаток, а именно кипятильные трубки уже были изогнуты так, что позволяли производить внутреннюю очистку любого ряда труб (рис. 167), и в новой конструкции котла представлялась возможность устроить кирпичную перегородку под паровым коллектором для защиты его от действия топочных газов.

Таблица 57[1]

№ по пор.	Наименование	Обознач.	Размерность	Название миноносцев					
				„Brazen“	„Electra“	„Recruit“	„Thorn“	„Tiger“	„Vigilant“
1	Поверхность нагрева котлов	$\sum H_к$	$м^2$	1114,8	1114,8	1114,8	1 165	1 165	1 165
2	Площадь колосниковых решеток	$\sum R$	$м^2$	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
3	Мощность котлов	N_i	*и. л. с.*	6 539	6 567	6 581	6 540	6 840	6 218
4	Скорость хода	W	узлы	29,6	29,6	29,3	30,2	29,9	30,1
5	Расход угля в час	B	*кг/ч*	7 400	6 900	6 940	6 940	7 250	6 720
6	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2$ *ч*	356	331	335	333	348	323
7	Паропроизводительность котла	D	*кг/ч*	52 500	49 000	49 300	49 300	51 500	46 900
8	Паронапряжение поверхн. нагр. котла	$\frac{D}{H}$	$кг/м^2$ *ч*	47	44,50	44,50	42,3	44,50	41
9	Расход угля на 1 *и. л. с. ч.* .	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и. л. с. ч*	1,13	1,05	1,06	1,06	1,06	1,08
10	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
11	Примерн. к. п. д. котла . . .	$\eta_к$	%	50	50	50	50	50	50

[1] Военные флоты 1901 г., стр. 399, 400. Испытания 1900 г.

Кожух котла также защищался от действия высоких температур газов посредством перегородки, сделанной из двух рядов труб, смещенных в одну плоскость.

Газы, как и раньше, двигались в сравнительно длинном газоходе вдоль топки. Направление движению газов давало особое устройство газоходов (рис. 168а—168b). Удлиненный путь газов позволял понизить температуру уходящих газов более, чем в других системах котлов. Устройство газохода, показанное на рис. 168а, невыгодно отличалось от данного на рис. 168b тем, что фронт котла при данном устройстве газохода нагревался сравнительно сильно, и условия работы кочегаров были более тяжелыми.

Чтобы получить более ясное представление о котлах Нормана новой конструкции (рис. 167), приводим наиболее интересные данные испытаний этих котлов (табл. 57).

В конце 90-х гг. нормановские котлы, как обладающие небольшим $\frac{G_к}{N_i}$, начали вытеснять из употребления котлы других систем, которые давали худшие эксплоатационные характеристики.

Котлы Нормана нашли большое применение во французском и других флотах (табл. 58).

Таблица 58

Число котлов Нормана, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. включительно

№ по порядку	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами в *и. л. с.*
1	Великобритания	28	116	100 000
2	Франция	31	130	155 000
3	Россия	12	84	48 000
4	Япония	4	8	17 000
5	Испания	3	16	17 000
6	США	7	22	20 000
7	Китай	1	8	7 000
8	Чили	1	4	5 000
9	Португалия	3	12	13 000
	Итого	90	400	382 000

В настоящее время имеется немало военных кораблей, где установлены котлы Нормана. Так, например, в Испании около 20 эсминцев постройки 1911—1918 гг. имеют котлы Нормана.

115. Котлы Нормана — Сигоди (Франция)

Для увеличения паропроизводительности котлов, предназначаемых для установки на крейсерах, в конце 90-х гг. XIX в. Норман по предложению своего друга железнодорожного инженера Сигоди построил сдвоенный котел[1]. Последний состоял из одного общего парового коллектора и четырех водяных, соединенных попарно между собой болтами (рис. 169). Между фланцами спаренных водяных коллекторов

[1] Англ. пат. № 4975, 1895 г.

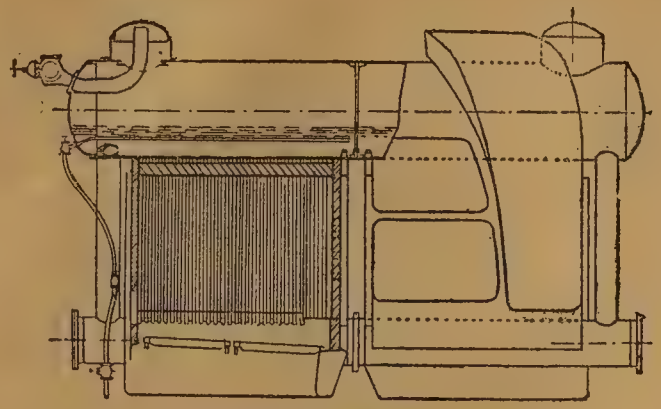


Рис. 169. Котел Нормана—Сигоди.

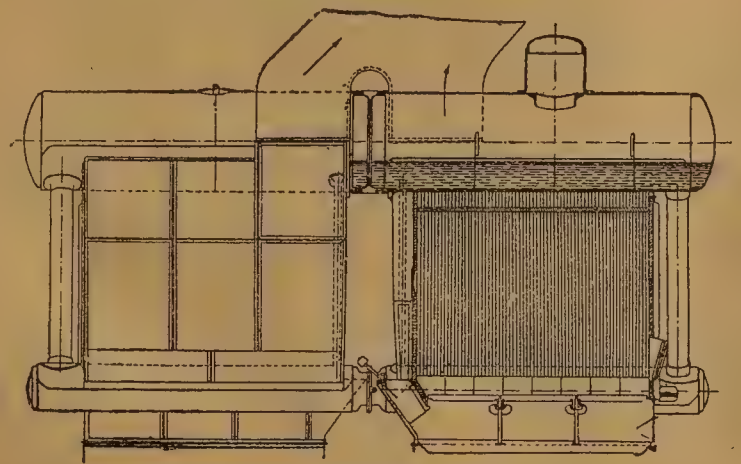


Рис. 170. Новый тип котлов Нормана—Сигоди.

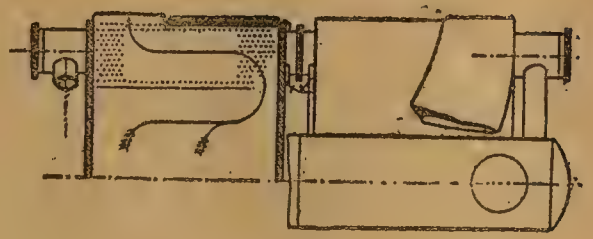


Рис. 169. Котел Нормана—Сигоди.

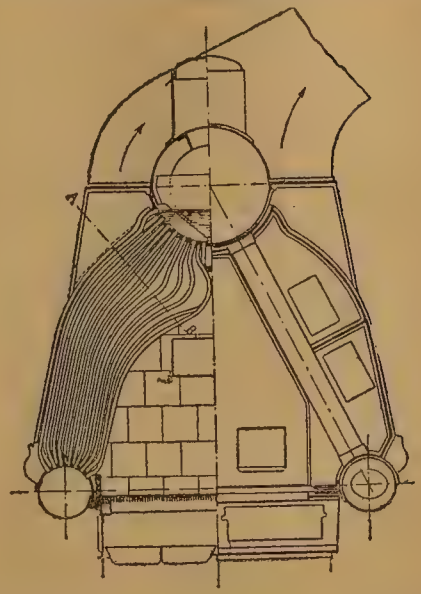


Рис. 171. Новый тип котлов Нормана—Сигоди.

ставилась большая заглушка. Каждый водяной коллектор соединялся с паровым циркуляционной трубой. Питательная вода подводилась в паровой коллектор с обоих его концов. В остальном котел Нормана — Сигоди почти ничем не отличался от предыдущего ординарного котла Нормана.

Этот котел, установленный в 1899 г. на французском крейсере «Jeanne d'Arc» (рис. 169, 169а), имел следующие основные характеристики:

Общая поверхность нагрева котла составляла	430	$м^2$
Площадь колосниковых решеток в 1 котле	9,3	»
Вес котла с водой	33,7	*т*
Вес воды в котле	6	»
Давление в котле	17,2	*ати*

На 1 *т* веса котла приходилось 12,75 $м^2$ поверхности нагрева против 13,1 $м^2$ в ординарном котле Нормана. Такое увеличение веса может быть объяснено повышенным давлением в котле, а стало быть, и утолщением стенок коллекторов.

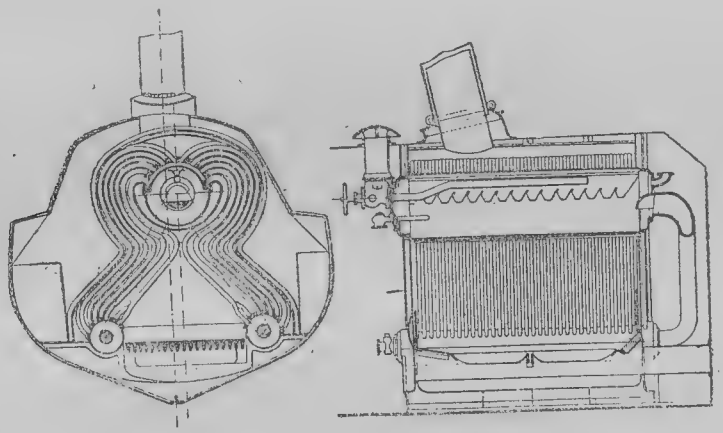


Рис. 172. Первый тип котлов Торникрофта.

Новый тип котла Нормана — Сигоди был установлен в 1898 г. на французском крейсере «Chateau Renault» мощностью в 23 000 *и. л. с.* (рис. 170, 171). Этот котел отличался от предыдущего лишь тем, что газы в нем двигались от передних стенок котла к середине.

Котлы Нормана—Сигоди и по настоящее время стоят на испанском крейсере «Rio de la Plata» мощностью 7000 *и. л. с.*

116. Котлы Торникрофта (Англия)

Показанный на рис. 172 котел Торникрофта[1] был построен в 1886 г. для английской миноноски.

Та же фирма построила в 1887 г. еще два котла для испанского миноносца «Ariete»[2]. Каждый из этих котлов состоял из одного паро-

[1] VDI. Стр. 1198, 1896; TINA. Стр. 267—292, 1896; TINA. Стр. 86—112, 1894; Revista general de marina, 1888.
Engineering. T. I, стр. 463, 1883.

[2] VDI. Стр. 911, 1887; Engineering. T. II, стр. 104, 1887.
Transactions of the institution of naval architects. Стр. 271, 1889.
Торникрофт получил следующие патенты: англ. пат. № 1404, 1885 г.; № 17809, 1890 г.; № 5215, 1899 г.; № 10436, 1899 г.; № 18838, 1894 г.; № 1297, 1894 г. Нем. пат. № 53469, 1890 г.; № 61588, 1891 г.

вого и двух водяных коллекторов, соединяющихся с паровым коллектором посредством двух пучков кипятильных труб.

Верхние концы труб входили в паровое пространство парового коллектора. Такое соединение было продиктовано желанием уменьшить гидравлическое сопротивление движению пароводяной смеси на высоту слоя воды в паровом коллекторе. При таком вводе труб в паровой коллектор почти не имело места вскипание воды в нем, что вело к уменьшению влажности пара из-за вскипания.

Для устранения вскипания в паровом коллекторе нижняя половина его защищалась от действия высоких температур топочных газов двумя сплошными стенками, составленными из двух передних рядов труб. Трубные стенки начинались недалеко от водяных коллекторов. Это обеспечивало почти полное омывание газами кипятильных труб по всей их длине.

Самым важным недостатком котла была невозможность очистки труб от накипи. Одновременно с этим при эксплоатации котлов

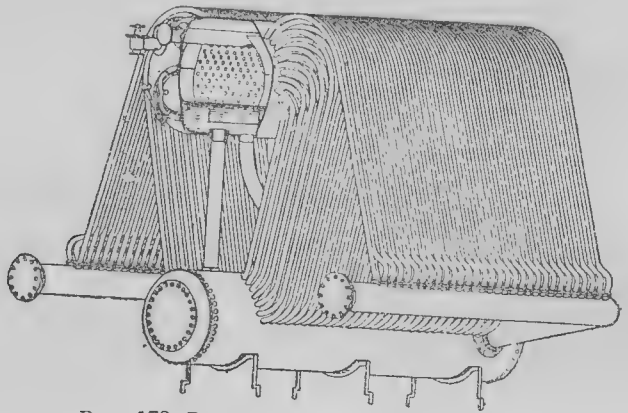


Рис. 173. Второй тип котлов Торникрофта.

Торникрофта большие затруднения создавала коррозия стальных кипятильных трубок.

Для уменьшения наружного ржавления их Торникрофт пробовал ставить медные и латунные трубки, но такая замена труб не оправдала себя. Ни медные, ни латунные трубки не могли выдерживать высоких термических напряжений, которым подвергались они, особенно в верхних своих частях, где удельное паросодержание в пароводяной смеси было более высокое.

После такой неудачи Торникрофт отказался от постановки медных труб и стал оцинковывать внутренние стенки стальных труб, но и это мероприятие не дало желаемых результатов. Цинковая оболочка растворялась кислотами, находящимися в котельной воде.

Образование пара и циркуляция воды в котле Торникрофта происходили таким образом: питательная вода поступала в нижнюю половину парового коллектора, а оттуда по двум циркуляционным трубам большого диаметра спускалась в водяные коллекторы. Из водяных коллекторов вода входила в кипятильные трубки, где происходило превращение части воды в пар. Пароводяная смесь из трубок поступала в паровое пространство коллектора. Здесь пар входил через щелевые прорези в пароприемную трубу, расположенную вверху коллектора. Вода же падала на дно коллектора и снова опускалась в водяные коллекторы по циркуляционным трубам.

По данным опытов бывшего инженера-механика флота США Лоринга, под котлом Торникрофта при максимальной форсировке удавалось сжигать в течение часа на 1 $м^2$ колосниковой решетки до 380 *кг* стандартного угля. Каждый килограмм угля испарял всего 5,3 *кг* стандартного пара, т. е. к. п. д. котла составлял только 34,5%.

Самый экономичный режим котла был при весовом напряжении решетки лишь в 44 $кг/м^2$ *ч*, а именно при влажности пара в 8% 1 *кг* угля испарял 10,55 *кг* воды, т. е. к. п. д. котла получался равным 67,0%.

По результатам опытов 1893 г. главного инженера-механика английского флота Дерстона, мощность котлов Торникрофта на миноносце «Speedy» на 1 *т* их веса составляла 43,9 *и. л. с.*

Не удовлетворившись этими данными, фирма Торникрофта продолжала дальнейшую работу по усовершенствованию своих котлов. В результате был разработан новый котел. Патент на него был взят в 1890 г. за № 17809.

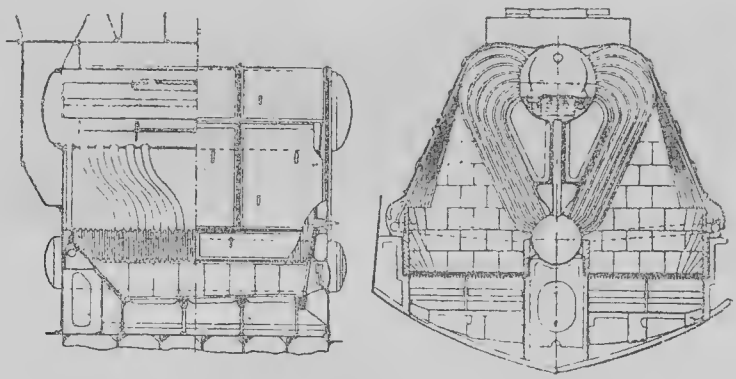


Рис. 174. Второй тип котлов Торникрофта.

Конструкция данного котла (рис. 173) отличалась от ранее рассматриваемого котла Торникрофта, главным образом, тем, что котел имел не два водяных коллектора, а три. Боковые коллекторы для соединения их со средним водяным коллектором загибались сзади топки под прямым углом. С паровым коллектором они соединялись посредством двух рядов труб, смещенных в одну сплошную трубную стенку. От среднего водяного коллектора в паровое пространство верхнего коллектора шли два пучка труб.

Против места входа кипятильных труб в паровой коллектор в нем были установлены два ряда угольников, служащих для механического осушения пара. При выходе из кипятильных трубок пароводяная смесь ударялась об эти угольники. В результате выпадала большая часть воды, содержащейся во влажном паре.

Для усиления циркуляции воды средний водяной коллектор соединялся с паровым посредством десяти S-образных и двух прямых трубок, расположенных по всей длине коллекторов. Как видно из рис. 174, эти трубки не омывались горячими газами.

По сообщениям Торникрофта[1] котлы данной конструкции, установленные на «Daring» и «Decay», при максимальной нагрузке их раз-

[1] Proceedings of the institution of civil engineers. April, 1895.

вивали мощность от 83 до 91 *и. л.* с. на 1 *т* своего веса с водой, но без дымовой трубы.

Увеличение мощности котлов Торникрофта новой конструкции против старой может быть объяснено тем, что в новом котле поверхность радиации почти в два раза больше.

Повышение мощности котлов объясняется также и лучшей циркуляцией воды в них благодаря наличию необогреваемого ряда S-образных циркуляционных труб.

В новом котле циркуляция поддерживалась удовлетворительной даже при наличии в паровом коллекторе весьма малого количества воды, так как циркуляционные трубки присоединялись к паровому коллектору в самой нижней части. Это обеспечивало одинаковый подвод воды из парового коллектора в водяной по всей его длине, чем достигалось более равномерное распределение воды по всем кипятильным трубкам.

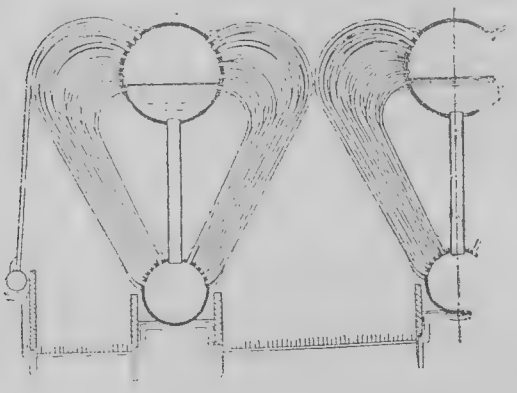


Рис. 175. Соединение котлов Торникрофта в группу.

Фирме Торникрофта удалось довольно легко и удобно скомпановать в одну обмуровку несколько котлов, что уменьшало котельную установку за счет сокращения поверхностей кожухов (рис. 175).

В процессе эксплоатации выявилось, что такое соединение котлов создает и определенный недостаток, а именно зависимость тяги в одном котле от тяги в других котлах. Помимо этого в случае повреждения одного котла приходилось выводить из строя и соседние неповрежденные, но скомпанованные в одной обмуровке. В более поздних конструкциях фирма уже отказалась от установки котлов в общую обмуровку.

Котлы Торникрофта получили большое распространение на речных и паровых катерах и пароходах.

На катерах (рис. 176) колосниковая решетка котлов состояла из кипятильных труб. Обслуживание такой решетки значительно облегчалось, так как нагар приставал к относительно холодным трубкам не так сильно, как к накаленным колосникам; но одновременно происходило и более интенсивное разъедание части кипятильных труб, входящих в состав решетки.

Оба типа котлов Торникрофта выгодно отличались от предыдущих малым объемом воды, что позволяло производить разводку пара в них без особой опасности в 15—20 минут. Это преимущество было сопряжено с требованием большей внимательности к питанию котлов. При незначительном несоответствии расхода воды и пара наблюдалось резкое колебание давления в котле.

Для уменьшения этого недостатка фирме Торникрофта пришлось снабжать свои котлы довольно сложными автоматическими регуляторами давления.

Котлы имели и другие недостатки, а именно:

1. Полную недоступность к вышедшим из строя трубкам.

2. Трудность внутренней очистки кипятильных труб благодаря их изгибу.

3. Разъедание кипятильных труб в верхних частях из-за невозможности удалить из них воздух при заполнении котла водой.

Для избавления от последнего недостатка Торникрофт в следующих конструкциях отказался от ввода кипятильных труб в паровое пространство и начал строить котлы, по своему внешнему виду очень похожие на нормановские. У новых котлов (рис. 177) наивысшая

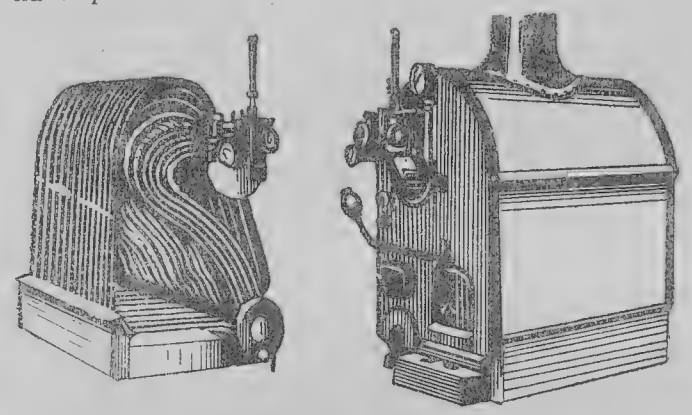


Рис. 176. Катерный котел Торникрофта.

точка трубы находилась на уровне ее присоединения к паровому коллектору. Большая часть трубок была присоединена в водяное пространство коллектора.

Такой же принцип ввода кипятильных труб в паровой коллектор был выдержан и в другой конструкции котлов большой мощности (рис. 178).

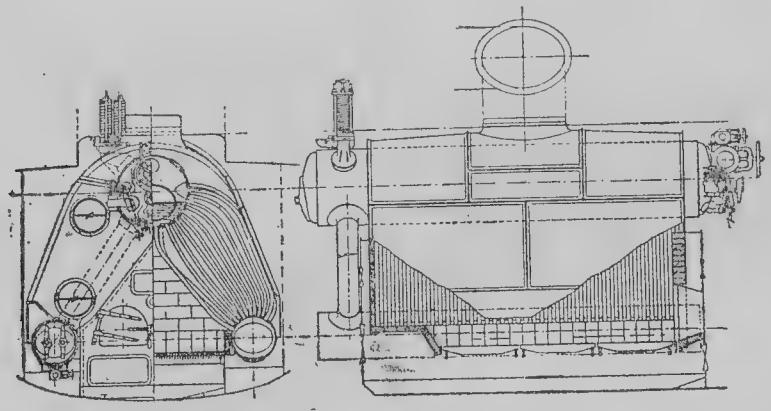


Рис. 177. Котел Торникрофта.

В данных котлах также имелось три водяных коллектора, но боковые коллекторы не соединялись со средним водяным коллектором. Для усиления циркуляции воды в котлах боковые водяные коллекторы соединялись с паровым коллектором двумя циркуляционными трубами, расположенными сзади котла, за обмуровкой. Средний же водяной коллектор соединялся с паровым несколькими S-образными трубами, изолированными от действия теплоты газов.

Эксплоатационные характеристики рассматриваемых котлов приведены в табл. 59.

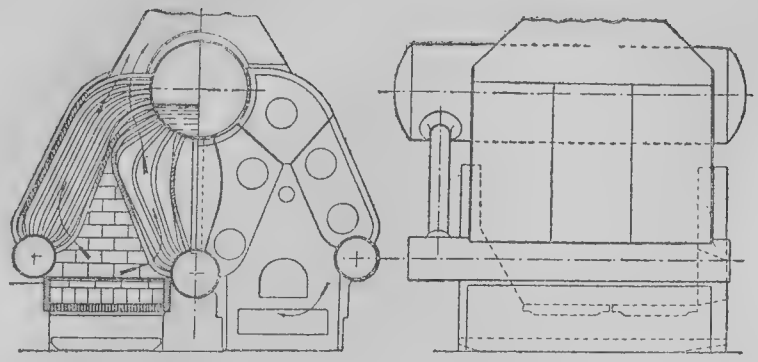


Рис. 178. Котел Торникрофта большой мощности.

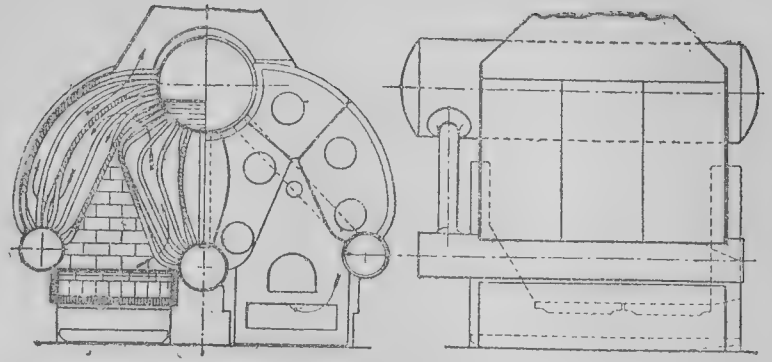


Рис. 179. Котел Торникрофта — Шульца.

Таблица 59

Котлы Торникрофта

Название английских миноносцев	Водоизмещение m	Площадь колосник. решетки $м^2$ R	Пов. нагр. котла $м^2$ $H_к$	Мощность машины $и.\ л.\ с.$ N_i	Скорость в узлах W	Расход угля в $кг/ч$ B	Весовое напряжение решетки $кг/м^2\ ч$ $\frac{B}{R}$	Паропроизводительность котла $кг/ч$ D	Ориентир. паронапряж. поверхн. нагр. котла $кг/м^2\ ч$ $\frac{D}{H_к}$	Расход угля $кг/и.\ л.\ с.$ $\frac{B}{N_i}$	Испаритель-ность $кг/кг$ $И$	Ориентир. к. п. д. котла % η
„Albatross“ . . .	383	23,4	1480	7732	31,6	7950	340	62000	42	1,03	7,8	54
„Stag“	306	18	1120	5204	30,2	5510	310	41700	37	1,05	7,6	52,5
„Bullfinch“	318	22	1250	6022	29,5	6450	293	48000	38,5	1,07	7,6	51
„Dove“	322	22	1250	5802	29,3	7250	330	58000	46,5	1,25	8,0	55
„Falcon“	333	22,7	1210	6299	30,1	6330	280	50700	42	1,01	8	55
„Ostrich“	331	22,7	—	6311	30,1	6310	275	50,5	41,8	1,0	8,0	55

Некоторые изменения в конструкцию котлов Торникрофта ввел инженер-механик германской фирмы Крупп—Шульц. Новые котлы получили название котлов Торникрофта — Шульца[1] (рис. 179).

Отличаются они от котлов Торникрофта, показанных на рис. 178, только устройством трубных перегородок, поставленных так, чтобы газы подымались сначала по среднему пучку труб, а затем делали по крайним пучкам два хода вниз и вверх.

Благодаря надежности работы, котлы Торникрофта всех конструкций получили широкое распространение на кораблях военного флота (табл. 60).

Таблица 60

Число котлов Торникрофта, установленных и строившихся для военных судов в 1900 г.

№ по порядку	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами, в *и. л. с.*
1	Великобритания	49	230	266 000
2	Франция	3	6	4 000
3	Япония	6	19	36 000
4	Германия	8	39	47 000
5	Россия	1	18	23 000
6	Австро-Венгрия	3	14	13 000
7	Дания	2	16	6 000
8	Норвегия	12	24	31 000
9	США	7	19	21 000
	Итого	91	385	447 000

После удачных испытаний первых котлов Торникрофта появились подражатели его конструкциям. Так, например, Мошер в 1892 г. заявил в Америке патент на котел, который напоминал собой первую конструкцию котлов Торникрофта.

117. Котлы Мошера (США)

Котлы Мошера[2] (рис. 180) состояли как бы из двух отдельных котлов, не связанных между собой. Кипятильные трубки в них изгибались почти так же, как и у котлов Торникрофта (рис. 176).

Задняя стенка котла была частично экранирована. Спереди котлы снабжались циркуляционными трубами диаметром в 100 *мм*.

Процесс генерации пара и циркуляции воды в котле Мошера происходил совершенно так же, как и в котлах Торникрофта.

Отличительной особенностью данного котла была постановка спирального винта в пароприемную трубу, расположенную в верхней части парового коллектора. Путем установки винта конструктор пытался получить лучшее осушение пара.

[1] Англ. патенты на котлы Шульца: № 15788, 1898 г.; № 8162, 1900 г.; № 15848 1901 г.; № 4160, 1901 г. Нем. пат. № 81520, 1894 г.; № 86402, 1894 г.; № 87431, 1894 г. № 144743, 1898 г.; № 160568, 1901 г.

[2] American Engineer. Стр. 466. New-York, 1895; VDI. Стр. 1233, 1896. Англ. пат. № 1725, 1892 г.; № 17285, 1894 г.; нем. пат. № 84453, 1894 г.

Котел Мошера (рис. 180) имел поверхность нагрева 45 *м*². Площадь колосниковой решетки 1,1 *м*². Вес котла и развиваемая им мощность нам неизвестны.

Невыгодной особенностью данного котла было расположение дымохода сбоку и спереди котла. Оно вызывало неравномерное распределение газов по нагревательной поверхности. Большая часть газов устремлялась по линии наименьшего сопротивления через левую половину котла. Это приводило к перегрузке данной части поверхности нагрева и большой недогрузке остальных поверхностей нагрева котла, особенно правой его половины.

Эксплоатация котла Мошера выявила также частые появления течи в местах развальцовки передних рядов трубок с водяными коллекторами. Появление здесь течи можно объяснить перегревом стенок коллектора и трубок от непосредственного действия на них пламени.

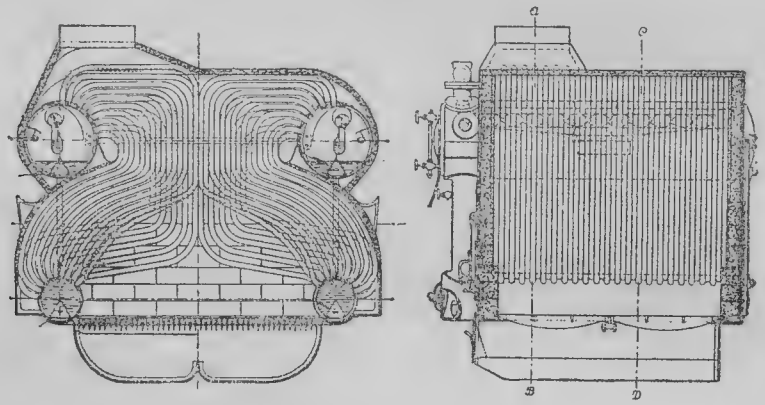


Рис. 180. Котел Мошера.

В последующих своих конструкциях Мошер защищал от пламени водяные коллекторы и концы передних трубок шамотными стенками (рис. 181). Для более равномерного распределения газов по поверхностям нагрева он устанавливал по средине топки шамотную перегородку. Такая перегородка, помимо улучшения в распределении газа, создавала лучшие условия для горения топлива. В периоды наиболее интенсивного горения она воспринимала на себя часть тепла путем лучевосприятия. В первый момент после загрузки топлива она, наоборот, отдавала излучением часть своего тепла свежезаброшенному топливу и этим ускоряла процесс воспламенения топлива и сглаживала свойственную ручному угольному отоплению неравномерность процесса горения.

Утяжеление веса котла за счет перегородки и частые ремонты составляют недостатки котлов Мошера.

Разбираемая конструкция данного котла (рис. 180) была установлена на американских яхтах «Norwood» и «Teiseen». Поверхность нагрева котла на «Norwood» составляла 93 *м*², площадь колосниковой решетки — 24 *м*², вес котла 2,3 *т*, рабочее давление пара в котле — 14,5 *ати*; мощность, развиваемая котлом, неизвестна.

Мошер строил котлы и для паровых катеров (рис. 182).

Катерный котел Мошера отличался от такого же котла Торникрофта тем, что его колосниковая решетка была выполнена не

из кипятильных труб, а из чугунных колосников. Из-за большого веса эти котлы получили малое распространение на паровых катерах.

Выгодную особенность котлов Мошера представляли большая высота и объем топки, что способствовало уменьшению химической неполноты горения.

Частичное экранирование задней стенки топки позволило увеличить паропроизводительность котла и удлинить срок службы задней стенки.

По сведениям Мошера, котел, данный на рис. 181, имел следующие характеристики:

Поверхность нагрева котла	102 *м*²
Давление в котле	17,6 *ати*
Влажность пара	1,5 %
Давление воздуха в зольнике	62 *мм*
Температура питательной воды	15 °Ц
Испарено воды 1 *кг* стандартного угля	8,5 *кг/кг*

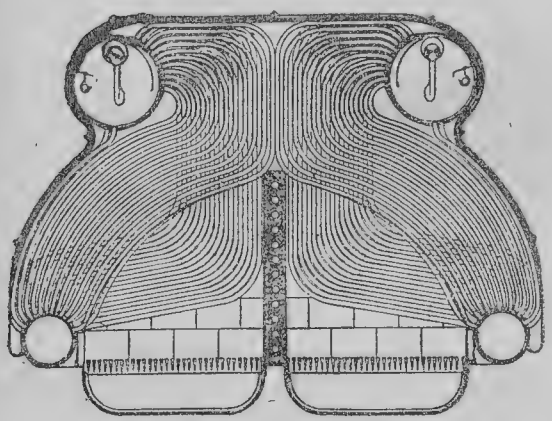


Рис. 181. Второй тип котла Мошера.

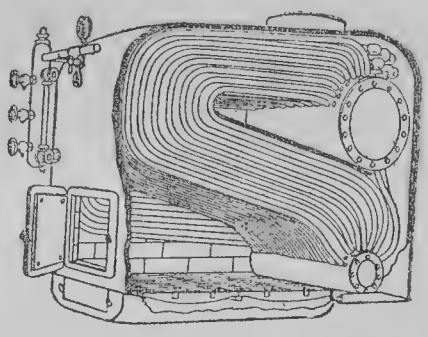


Рис. 182. Катерный котел Мошера.

Эти данные неполны, и по ним трудно сделать вывод об эксплоатационных преимуществах котла.

Необходимо указать, что основные недостатки котлов Торникрофта, а именно невозможность внутренней очистки труб из-за сложной кривизны их и возможность коррозии верхних колен труб, не были изжиты и в котлах Мошера.

Недостатки эти были настолько велики, что Мошер в 1895 г. отказался от постройки первых конструкций своих котлов и начал выпускать новые котлы (рис. 183), в которых упомянутые недостатки были исключены. Постановка и выемка кипятильных трубок в его котле теперь производилась через специальные отверстия в паровом коллекторе.

Боковые стенки котла были покрыты экраном. Вода поступала в экран через нижний коллектор по циркуляционной трубе. Часть воды входила в водяной коллектор. Пароводяная смесь, образовавшаяся в экране, поступала в паровое пространство коллектора по верхним коллекторам экрана.

Часть экрана, расположенную над пучком труб, можно считать балластом с точки зрения тепловосприятия, так как излучающая способность газов, покидающих конвекционную поверхность нагрева котла при низкой температуре, примерно в 100 раз менее излучающей способности топочных газов.

Преимуществами данного котла по сравнению с другими котлами Мошера были:

1) большая поверхность нагрева, воспринимающая теплоту газов путем излучения их;

2) легкость замены любой поврежденной кипятильной трубки через паровой коллектор;

3) возможность внутренней очистки труб котла.

Но в данной конструкции обнаружился и ряд новых недостатков, главные из которых:

1) очень низкая высота топки, особенно в задней части, что не исключало возможности пережога первых рядов кипятильных труб у водяного коллектора;

2) неэффективное использование поверхности нагрева части экрана, расположенной над пучком кипятильных труб.

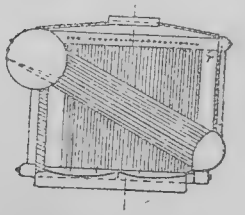


Рис. 183. Третий тип котла Мошера.

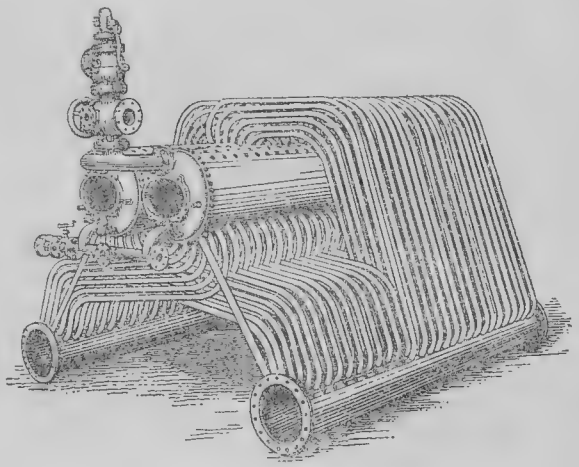


Рис. 184. Котел Уорда.

Во флоте котлы Мошера были слабо распространены, а в настоящее время и совсем не применяются.

Рассмотренные котлы показывают, что изобретение большинства котлов не есть что-то совершенно оригинальное и новое. Очень редко изобретатели вносили коренные изменения в конструкцию котла. Наоборот, почти все изобретатели копировали в своих котлах конструктивные особенности одного или нескольких уже существующих или существовавших котлов, внося лишь небольшие изменения, подсказываемые опытными и эксплоатационными наблюдениями и требованиями флота в данное время, и только в результате коллективной работы многих конструкторов и длительного эксплоатационного опыта вырабатывались новые конструкции более совершенных котлов.

Стремление соединить лучшие стороны нескольких конструкций не всегда достигало цели. Примером такой неудачной комбинации можно считать котел Уорда, в котором воплощены конструктивные особенности трех котлов: Нормана, Торникрофта и Мошера.

118. Котел Уорда (США)

Как показано на рис. 184, в котле Уорда [1], как и в котлах Мошера, имелись два водяных и два паровых коллектора. Паровые и водяные коллекторы соединялись между собой посредством перекрещиваю-

[1] VDI. Стр. 1234, 1896.

щихся рядов кипятильных труб. Левый водяной коллектор соединялся с правым паровым коллектором двенадцатью рядами кипятильных труб, и, наоборот, правый водяной коллектор соединялся с левым паровым коллектором также 12 рядами кипятильных труб.

Ряды труб поочередно соединяли водяной коллектор то с водяным, то с паровым пространством парового коллектора. Так, например, первый наружный ряд труб правого водяного коллектора входил в паровое пространство левого парового коллектора, а следующий за ним ряд труб входил уже в водяное пространство того же парового коллектора, и т. д.

Таким образом шесть рядов труб входили в паровое пространство парового коллектора, как у котлов Торникрофта, а шесть рядов труб входили в водяное пространство парового коллектора, как у котлов Нормана.

Для усиления циркуляций воды паровые и водяные коллекторы были соединены циркуляционными трубами. Следовательно, если не считать циркуляционные трубы, котел Уорда состоял из двух котлов, ничем между собой не связанных.

Два таких котла были установлены на пароходе «Unique», плававшем на американских великих озерах.

Основные характеристики этого котла:

Поверхность котла	185 $м^2$
Площадь колосниковой решетки	4,65 $м^2$
Вес котла с принадлежностями	9 $т$
Давление пара в котле	15,88 $ат$
Мощность котла	700—900 *и. л. с.*
Габаритные размеры котла	$2{,}7 \times 2{,}45 \times 2{,}9$ $м^3$

Преимуществами котла Уорда можно считать:

1. Возможность свободного расширения кипятильных труб.
2. Относительно хорошее обтекание труб дымовыми газами.
3. Возможность получения хорошей конфигурации топочного пространства.

Но эти преимущества были достигнуты ценой весьма важных недостатков котла:

1. Невозможность внутренней очистки труб.
2. Трудность замены поврежденных кипятильных труб новыми, благодаря их перекрещиванию и сложному изгибу.
3. Слабая циркуляция воды в котле.
4. Наличие парового коллектора, лишнего в работе и являющегося балластом в весе котла.

Котлы Уорда не получили распространения не только в военном, но и в коммерческом флоте. Они были установлены лишь на упомянутом пароходе.

119. Котлы Блекиндена [1]

Одним из важнейших недостатков котлов Нормана, Торникрофта и многих других котлов треугольного типа была трудность замены поврежденной кипятильной трубки. Если кипятильная трубка находилась в средине пучка, то для ее замены приходилось вырезать целый ряд стоящих впереди трубок и вместо одной поврежденной трубки иногда необходимо было заменять до 10 трубок.

[1] VDI. Стр. 1202. 1896. Англ. пат. № 18311, 1893 г.; № 22949, 1893 г.

Блекинден в 1893 г. разработал конструкцию котла, которая (рис. 185, 185а) позволяла производить постановку и выемку любой кипятильной трубки через специальные горловинки в верхней части парового коллектора. Горловинки закрывались бронзовыми пробками. В коллекторе имелось два ряда таких горловинок, для каждого пучка труб по одному ряду. Кипятильные трубки имели небольшой изгиб

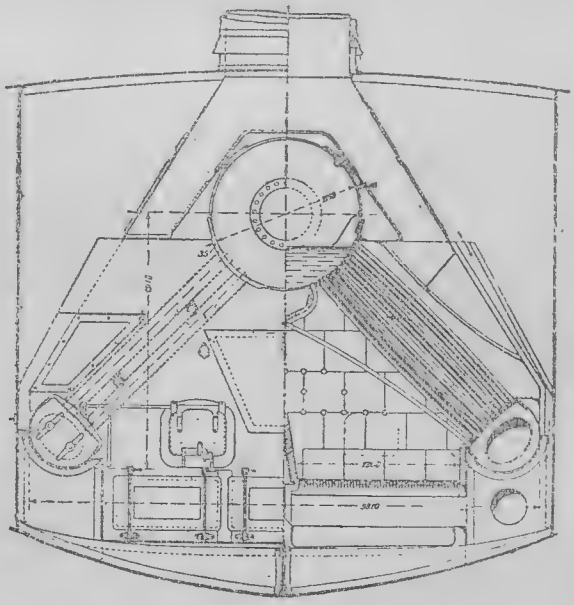


Рис. 185а. Котел Блекиндена.

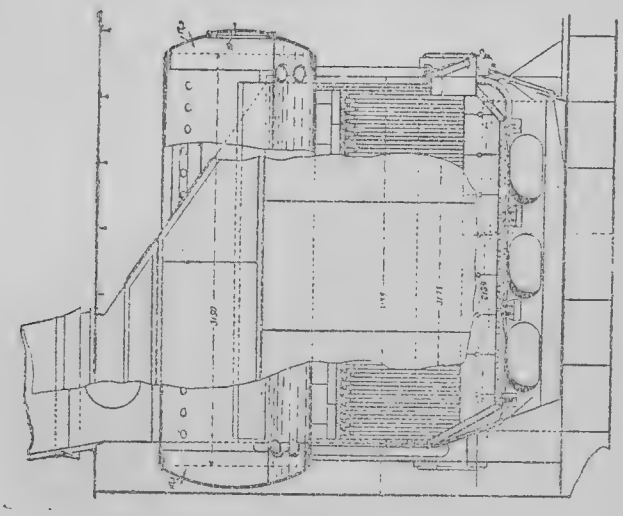


Рис. 185. Котел Блекиндена.

для более легкой выемки. Все трубки изгибались лишь по двум радиусам, что значительно облегчало и удешевляло ремонт котла.

Нижняя часть парового коллектора была защищена от действия высоких температур топочных газов огнеупорной перегородкой, положенной на два ряда перекрещивающихся труб.

Для усиления циркуляции котлы спереди и сзади снабжались циркуляционными трубами.

По эксплоатационным наблюдениям котлы Блекиндена развивали мощность около 80 *и. л. с.* на 1 *т* своего веса, т. е. примерно столько же, как и котлы Нормана и Торникрофта.

Легкая замена кипятильных трубок — основное преимущество котлов Блекиндена — была сопряжена с крупным недостатком, а именно: бронзовые пробки на паровом коллекторе часто парили. В 1894 г. Блекинден [1] стал изгибать кипятильные трубки внутрь топки, благодаря чему он добился замены двух рядов бронзовых пробок одним (рис. 186).

В новой конструкции котла Блекиндена было возможно вынимать или вставлять любую трубку любого пучка труб через одну из горловин, расположенных только в один ряд.

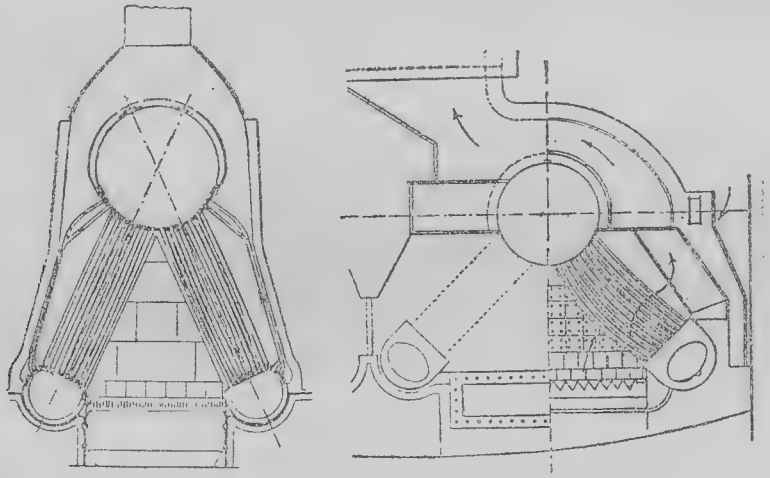


Рис. 186. Котел Блекиндена.

Основным недостатком котлов Блекиндена, в особенности его новых конструкций, был небольшой объем топочного пространства.

Котлы Блекиндена имели сравнительно небольшое распространение.

120. Котел Флеминга и Фюргюсона (Шотландия)

Задачу, поставленную Блекинденом, совсем по-иному разрешили Флеминг и Фюргюсон [2] в 1892 г. Для возможности замены кипятильных трубок через паровой коллектор они сделали последний очень большого диаметра, а кипятильные трубки короткими.

Сзади котла паровой коллектор соединялся с водяным коллектором вилкообразной циркуляционной трубой.

Показанный на рис. 187 котел Флеминга — Фюргюсона имел:

Поверхность нагрева котла	134,7 $м^2$
Площадь колосниковой решетки	4,64 $м^2$
Давление в котле	15,5 *ати*
Вес котла (без дымовой трубы)	30 *т*

Общий вес котла, отнесенный к 1 $м^2$ поверхности нагрева, составлял 224 $кг/м^2$ против 78 $кг/м^2$ у котлов Нормана, т. е. примерно в 3 раза больше.

[1] Transactions of institution of naval architects. Стр. 303, London, 1894.
[2] VDI. Стр. 1232, 1896; TINA., Стр. 246—308, 1894. Англ. пат. № 24141, 1892 г.

Таблица 61

Число котлов Блекиндена, установленных и строившихся для военных судов в 1900 г.

№ по порядку	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами, в *и. л. с.*
1	Великобритания	5	20	20 000
2	Италия	8	32	41 000
	Итого	13	52	61 000

Выгодными особенностями котлов Флеминга — Фюргюсона были:

1) простота обслуживания, обусловливаемая большим водяным объемом котла;

2) легкость внутренней очистки труб;

3) возможность выемки любой трубки из коллектора.

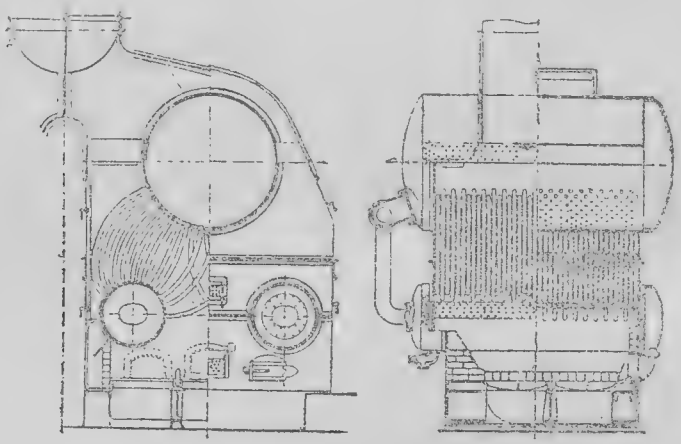


Рис. 187. Котел Флеминга — Фюргюсона.

Но наряду с этим котлы Флеминга — Фюргюсона имели большой вес, который может быть объяснен чрезвычайно большим диаметром парового коллектора, большим числом водяных коллекторов и чрезвычайно малым отношением поверхности нагрева к длине коллектора.

Второй существенный недостаток этих котлов — небольшая высота топки и обнаженность водяных коллекторов.

Котлы Флеминга — Фюргюсона не получили широкого распространения даже в коммерческом флоте.

121. Котлы Рида (Англия)

Стремление уменьшить тяжеловесность котла и одновременно сохранить его небольшую высоту — основное преимущество котлов Флеминга — Фюргюсона — побудило Рида[1] спроектировать в 1893 г.

[1] VDI. Стр. 1203—1204, 1896; The Engineer. Т. I, стр. 172, 1896. Англ. пат. № 22982, 1893 г.; № 24121, 1893 г.; № 4659, 1896 г.

котел треугольного типа небольшой высоты, но с длинными кипятильными трубками (рис. 188, 188а).

Последние два трудно совместимые требования ему удалось осуществить, придав кипятильным трубкам сложную изогнутую форму.

Другой отличительной особенностью котлов Рида был оригинальный способ закрепления кипятильных трубок в коллекторах (рис. 189).

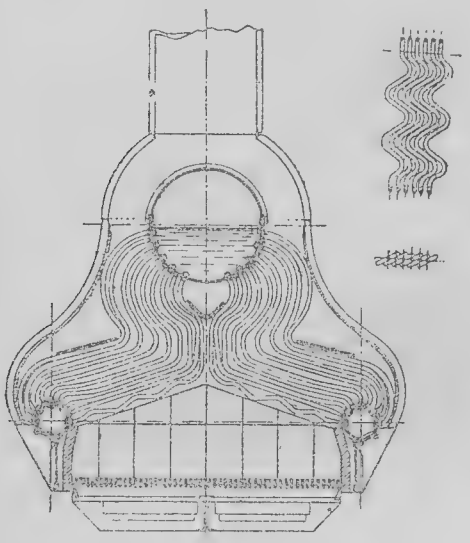


Рис. 188. Котел Рида.

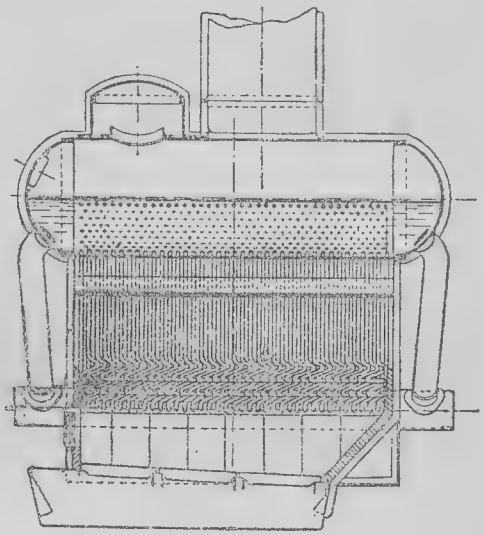


Рис. 188а. Котел Рида.

Уплотнение, осуществляемое здесь посредством навинчиваемых снаружи коллектора полушаровых втулок и закрепляемых изнутри гаек, почти не давало течи. Из находящихся в эксплоатации 30 000 таких закреплений ни одно не дало течи, несмотря на то, что напор воздуха в зольник доводился до 140 *мм* вод. ст.

Для достижения более равномерного омывания газами поверхностей нагрева Рид устанавливал на задних кипятильных трубках шамотные щитки (рис. 188).

Для усиления циркуляции водяные коллекторы соединялись с паровым коллектором посредством четырех циркуляционных труб, расположенных по две вне обмуровки спереди и сзади котла.

Котлы были снабжены регуляторами питания системы Рида; каждый котел питался от своего насоса.

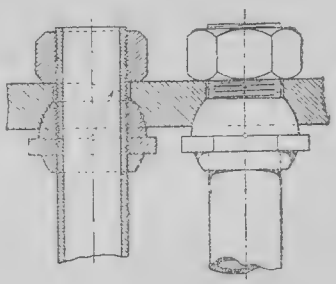


Рис. 189. Способ крепления трубок в котле Рида.

Кожух котла состоял из двух стальных листов с воздушной прослойкой между ними. Со стороны поверхности нагрева кожух был покрыт асбестовым листом. Нижняя часть кожуха, обращенная к топке, была облицована огнеупорным кирпичом. Вес котлов Рида на 1 *т* производимого пара составлял 1,04 *т*. Котлы Рида были установлены на нескольких минных крейсерах и крейсерах III класса.

В табл. 62 приведены основные эксплоатационные характеристики котлов Рида, установленных на военных судах «Peterel», «Zephir» и «Pegasus» [1].

Таблица 62

Название английских миноносцев	Водоизмещение m	Площадь колосниковой решетки $м^2$	Поверхность нагрева $м^2$	Мощность $и.л.с$	Скорость в узлах	Расход угля в час $кг/ч$	Весовое напряжение решетки $кг/м^2ч$	Паропроизводительность котла $кг/ч$	Паронапряж. пов. нагрева котла $кг/м^2ч$	Расход угля $кг/и.л.с.$	Ориентиров. испарительность топл. $кг/кг$	Ориентиров. к. п. д. котла %
		R	$H_к$	N_i	W	B	$\frac{B}{R}$	D	$\frac{D}{H_к}$	$\frac{B}{N_i}$	$И$	η
„Peterel“ . . .	340	24	1280	6444	30,1	6700	280	51500	40	1,04	7,7	53
„Zephir“ . . .	236	22,1	930	3885	27,2	—	—	30860	—	—	—	—
„Pegasus“ . .	—	32	1750	7127	—	—	—	57000	—	—	—	—

Как показывает табл. 62, важнейшие характеристики котлов Рида $\frac{B}{R}$, $\frac{D}{H_к}$ для того времени можно считать вполне удовлетворительными. Несмотря на это, котлы Рида не получили широкого распространения (табл. 63). Это можно объяснить: 1) недостаточной циркуляцией воды в них из-за небольшого напора ее в циркуляционных трубах и относительно больших гидравлических сопротивлений в кипятильных трубках; 2) возможностью пережога передних рядов кипятильных труб из-за действия в них пламени, так как топки в этих котлах были низкие.

Таблица 63

Число котлов Рида, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. включительно

Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами, в *и.л.с.*
Великобритания	20	94	117 000

122. Котлы Ленца (Германия)

Попытка увеличения поверхности нагрева за счет удлинения кипятильных трубок при небольшой высоте котла была по-иному оформлена конструктивно Ленцем [2] в 1896 г. (рис. 190, 191).

[1] Engineer. T. I, стр. 172, 1896.

[2] Англ. пат. № 5031, 1896 г. VDI. Стр. 1273, 1896. Hutton. Steam boiler construction. Стр. 512. 1898. Нем. пат. № 91402, 1896 г.

Одновременно Ленц поставил себе и другую задачу: уменьшить химический и механический недожог топлива при сравнительно небольшом объеме топки.

Для решения второй задачи Ленц снабжал свои котлы топками большого объема. Более полного сжигания топлива Ленц достигал

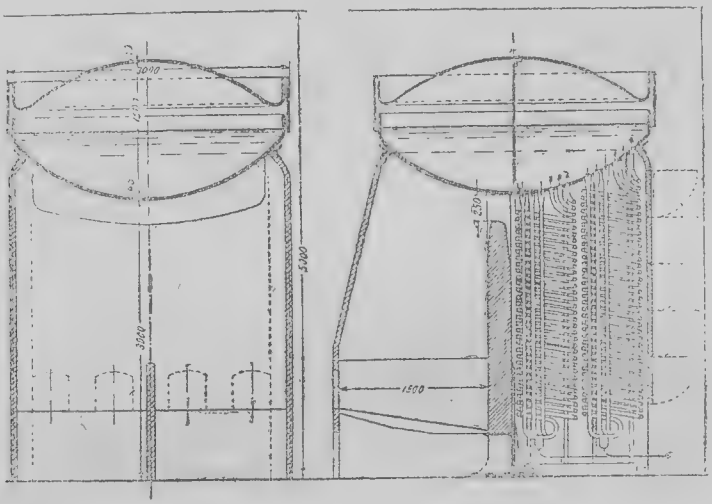


Рис. 190. Котел Ленца.

повышением топочной температуры газов за счет уменьшения тепла, передаваемого воде излучением.

Конструктивно повышение топочных температур осуществлялось путем постановки огнеупорной стены, отделяющей топку от конвекционной поверхности нагрева котла.

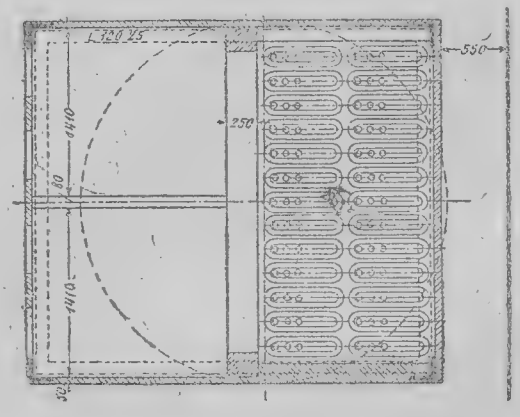


Рис. 191. Котел Ленца.

Поверхность нагрева котла Ленц выполнил из 26 сплющенных змеевиков, каждый из которых состоял из трех трубок. На рис. 192 показан способ крепления трубок.

Вода в каждый змеевик поступала по трем трубкам, идущим внутри змеевика. Перед поступлением в змеевик вода проходила через грязевик, где осаждались механические примеси. Образовавшаяся в змеевиках пароводяная смесь входила в паровой коллектор, вызывая сильное вскипание воды. Чтобы вскипание не распространялось на всю водяную поверхность коллектора, последний разделялся перегородкой на две половины. В перегородке прорезались щели с наибольшим числом заусенец для лучшего осушения пара во время его перехода в паровое пространство.

Некоторое представление об основных характеристиках котла Ленца может дать табл. 64.

Таблица 64

№ по порядку	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	95,5
2	Площадь колосниковой решетки .	R	„	2,12
3	Топливо	—	—	паров. уголь
4	Сожжено угля за час	B	$кг/ч$	207
5	Весовое напряжение решетки . . .	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	97,7
6	Испарено воды за час ($\Delta i = 540$ $кал/кг$)	D	$кг/ч$	2020
7	Получено стандартного пара за час ($\Delta i = 640$ $кал/кг$)	$D_с$	„	1700
8	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	21,1
9	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_с}{H_к}$	„	18
10	Видимая испарительность топлива .	$И_в$	$кг/кг$	9,7

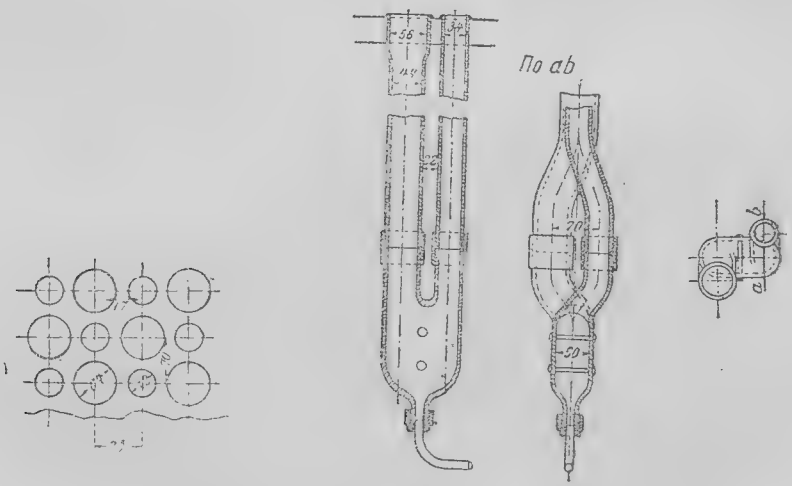


Рис. 192. Трубки котла Ленца.

Невыгодной особенностью котлов Ленца являлся их большой вес. Так, например, вес котла Ленца, отнесенный к 1 $м^2$ колосниковой решетки, составлял 7 *т* против 3,67 *т* у котлов Нормана.

Другим не менее важным недостатком следует считать невозможность внутренней очистки труб и чрезвычайно тяжелые условия работы кочегаров из-за высокой температуры топочного кожуха.

Котлы Ленца получили ограниченное применение в военном флоте.

123. Котлы Уайта (США)

В 1889 г. Уайт[1] взял патент на свой котел. Как видно из рис. 193, 193а, паровой коллектор котла Уайта соединялся с двумя водяными коллекторами большим числом спиральных труб.

Передняя и задняя стены кожуха защищались от действия высоких температур трубками (правая сторона рис. 193). Перед наружным

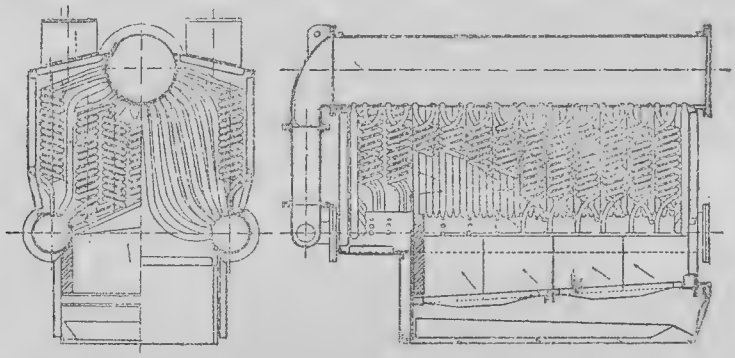


Рис. 193. Котел Уайта.

рядом спиральных труб была поставлена трубная перегородка. Она поддерживала паровой коллектор и направляла газы по двум дымоходам, расположенным в задней части котла. Для усиления циркуляции водяные коллекторы соединялись с паровыми двумя циркуляционными трубами.

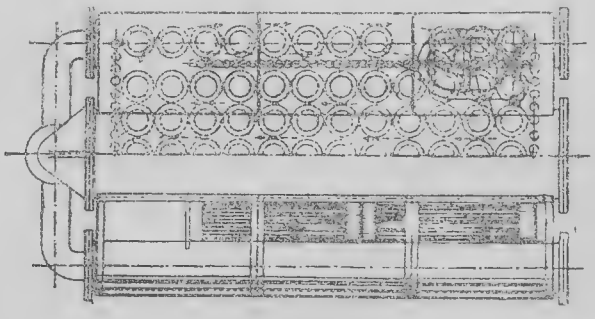


Рис. 193а. Котел Уайта в плане.

Котлы Уайта были установлены на английских машинных крейсерах; на каждом крейсере стояло по 3 котла.

Суммарная поверхность нагрева котлов составляла . .	1044 *м*²
Площадь колосниковой решетки равнялась	19,7 *м*
Полный вес котла равнялся	83 *т*
Паровые машины, получающие пар от этих котлов, развивали мощность	4930 *и. л. с.*
На 1 *т* веса котлов приходилось	59,4 *и. л. с.*

Выгодной особенностью котла Уайта была возможность размещения большой поверхности нагрева при небольшом весе котла и малых диаметрах коллекторов.

---

[1] Англ. пат. № 6934, 1889 г.; № 22222, 1897 г.; № 26034, 1898 г.; № 18076, 1893 г. VDI. Стр. 1236, 1896. Transactions of the institution of naval architects. Стр. 303, 1894.

Увеличение поверхности нагрева котла за счет спиральной формы труб влекло за собой и ряд существенных недостатков. Главные из них:

1. Недостаточная циркуляция воды в котле из-за больших гидравлических сопротивлений в спиральных трубках. Слабая же циркуляция воды часто приводила к перегоранию трубок.

2. Невозможность внутренней очистки труб.

Указанные здесь недостатки заставили Уайта отказаться от данной конструкции котлов. В 1897 г. Уайт совместно с Фостером сконструировал новый котел (рис. 194). Отличительной особенностью нового котла являлась небольшая длина кипятильных трубок и изгиб их по одному радиусу. Это давало возможность производить их замену, как и в котле Флеминга — Фюргюсона, через паровой коллектор.

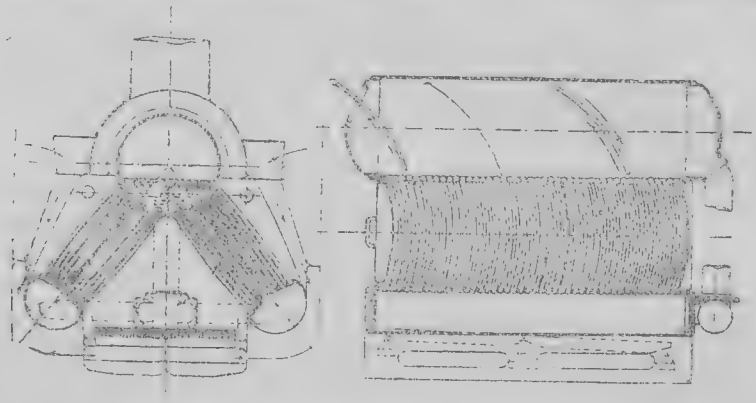


Рис. 194. Котел Уайта — Фостера.

Котел Уайта выгодно отличался от котлов Флеминга — Фюргюсона тем, что в его котле трубы одинаковой длины, благодаря их изгибу, могли вставляться через паровой коллектор меньшего диаметра, чем у котлов Флеминга — Фюргюсона.

Для усиления циркуляции воды в котле паровой коллектор у котлов Уайта — Фостера соединялся с водяными коллекторами молоткообразной циркуляционной трубой. Котлы работали надежно и легко допускали внутреннюю очистку и замену труб. Они распространены в Америке и в настоящее время.

124. Котлы Коульса (США)

Из других вертикально-водотрубных котлов небольшой высоты заслуживают внимания котлы Коульса [1]. Как видно из рис. 195, котлы Коульса состояли из трех паровых и двух водяных коллекторов. Водяные и паровые коллекторы соединялись между собой 24 рядами кипятильных труб.

Отличительной особенностью данного котла являлось расположение топки не под конвекционным пучком труб, а перед ним. Топка в котле была экранирована со всех сторон, кроме фронтовой стенки. Боковые стенки и потолок экранировались двумя рядами труб. Трубы эти вверху входили в средний паровой коллектор, который специально для этой цели тянулся по всей длине топки.

[1] Англ. пат. № 1161, 1889 г. VDI. Стр. 1235, 1896.

Для защиты парового коллектора от действия высоких температур топочных газов два ряда экранных труб перекрещивались между собой. Другие концы экранных труб входили в U-образный экранный коллектор, помещенный в зольной камере с фронта котла. Он соединялся с паровым коллектором вилкообразной циркуляционной трубой.

Процесс образования пара в котле Коульса происходил так. Вода из парового коллектора опускалась по циркуляционной трубе и через экранный коллектор поступала в экран и в водяные коллекторы, расположенные за топочным порогом. В экране и конвекционном пучке труб вода, нагреваясь, частично превращалась в пар. Образовавшаяся пароводяная смесь подымалась по кипятильным и экранным трубкам в паровые коллекторы, где происходило осушение пара. Вода, отделившаяся от пароводяной эмульсии, снова опускалась в циркуляционные трубы, и таким образом цикл повторялся. В водяные коллекторы вода могла поступать из паровых коллекторов и, помимо циркуляционной трубы, через задние ряды кипятильных трубок, соединяющих паровой и водяной коллекторы. Топочные же газы проходили конвекционный пучок труб, затем, подымаясь вверх у задней стенки котла, уходили в дымовую трубу.

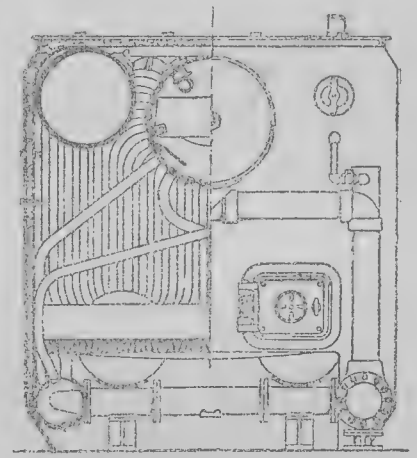


Рис. 195. Котел Коульса.

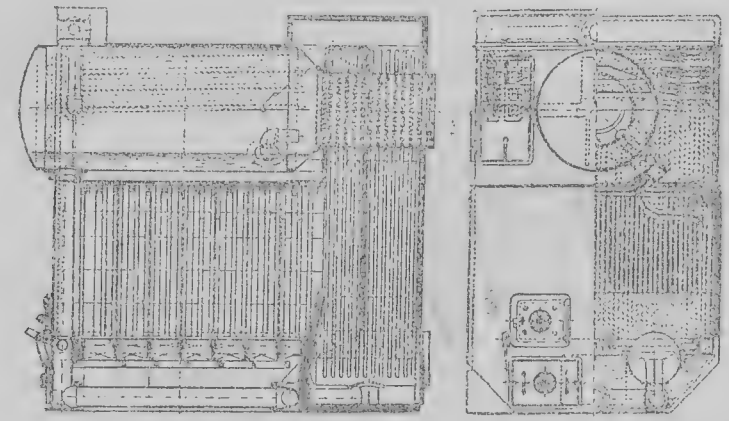


Рис. 196. Вторая конструкция котла Коульса.

Большое преимущество котлов Коульса составляло почти полное экранирование топки, а также возможность внутренней очистки кипятильных труб. Главным недостатком котлов был значительный вес, вызванный применением большого количества коллекторов.

Несколько позднее Коульс учел этот недостаток своего котла и для уменьшения его веса изменил конструкцию (рис. 196). Он выбросил боковые паровые коллекторы и на их месте над топочным экраном расположил два пучка труб пароперегревателя, а в конвекционном пучке труб поставил вертикальную перегородку, заставлявшую

разы делать два хода (вверх и вниз). Это изменение не дало удовлетворительных результатов, так как котел попрежнему остался тяжелым из-за чрезмерно большого веса парового коллектора.

В 1889 г. котлы Коульса измененной конструкции были тщательно испытаны механиками флота США. Результаты испытаний показали, что котел Коульса давал меньшую паропроизводительность, чем выше описываемые котлы Уорда. Котлы Коульса получили весьма ограниченное применение на судах.

125. Котлы Ярроу (Англия)

Так как большинство вышерассмотренных котлов было забраковано практикой из-за невозможности производства в них внутренней очистки труб, многие изобретатели, разрабатывая свои котлы, основной упор делали на максимальную доступность к кипятильным трубкам для их осмотра и очистки.

Наибольшую работу в этом отношении проделал Ярроу [1]. Первый свой котел Ярроу сконструировал в 1887 г. Этот котел (рис. 197) состоял из прямых кипятильных труб и разъемных коллекторов.

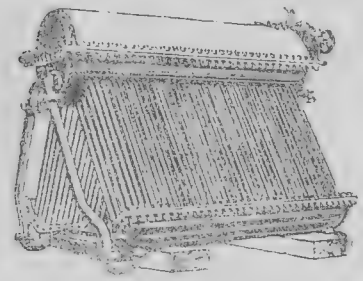


Рис. 197. Первая конструкция котла Ярроу.

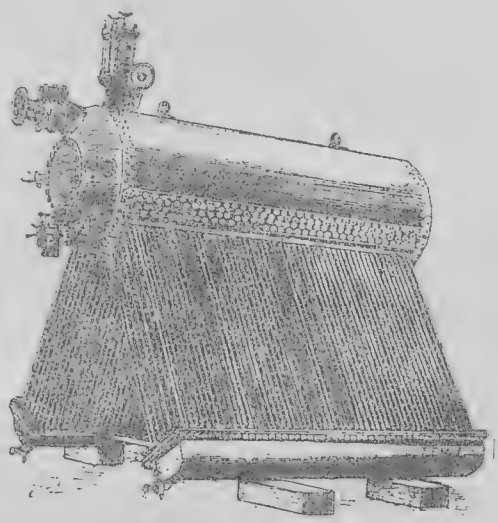


Рис. 198. Вторая конструкция котла Ярроу.

Представлялась полная возможность произвести тщательный осмотр труб и очистку их изнутри от накипи, для чего требовалось только отвернуть болты и снять крышки коллекторов.

Устройство разъемных коллекторов имело и свои недостатки. Трудно было достигнуть необходимой плотности в плоскостях соединения коллекторов. Так как боялись появления течи в местах данных соединений, то рабочее давление пара в котлах не допускали выше 10—12 *атм*. Кроме того, данные котлы требовали много времени на разъем коллекторов перед щелочением и после него. При производстве щелочения котла приходилось вскрывать коллекторы по 2 раза: один раз для снятия арматуры из коллекторов, второй раз для ее установки.

Для усиления циркуляции Ярроу снабжал свои котлы циркуляционными трубками, расположенными вне обмуровки. В циркуляционных

[1] Англ. пат. № 17958, 1889 г.; № 24689, 1893 г.; № 12931, 1897 г.; № 9364, 1900 г. VDI. Стр. 1237, 1896; TINA. Стр. 296—308, 1894; там же, стр. 267—292, 1896.

трубках никакого парообразования не происходило, и поэтому затормаживание опускания воды поднимающимися пузырьками совершенно отсутствовало.

Основные преимущества котлов Ярроу:

1. Возможность внутренней очистки труб.

2. Сравнительно хорошая циркуляция воды, обусловливаемая наличием циркуляционных труб и небольшими гидравлическими сопротивлениями из-за применения прямых кипятильных труб.

Невыгодной особенностью котлов Ярроу была невозможность разместить большое число рядов труб в пучке. При применении прямых

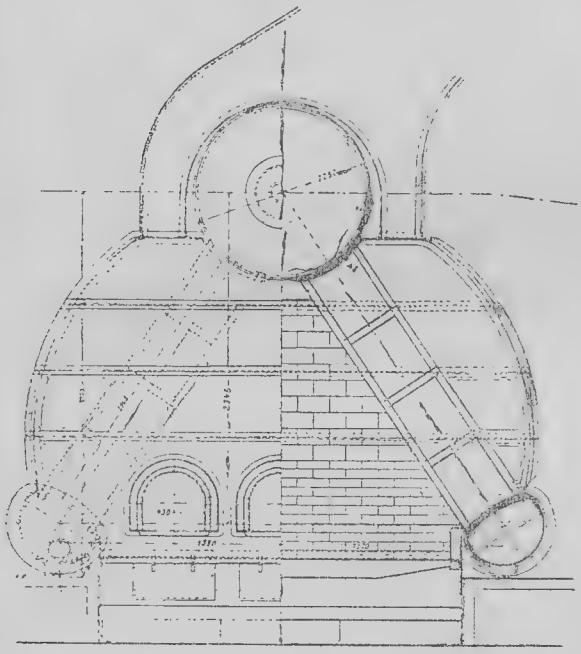


Рис. 199. Котел Ярроу.

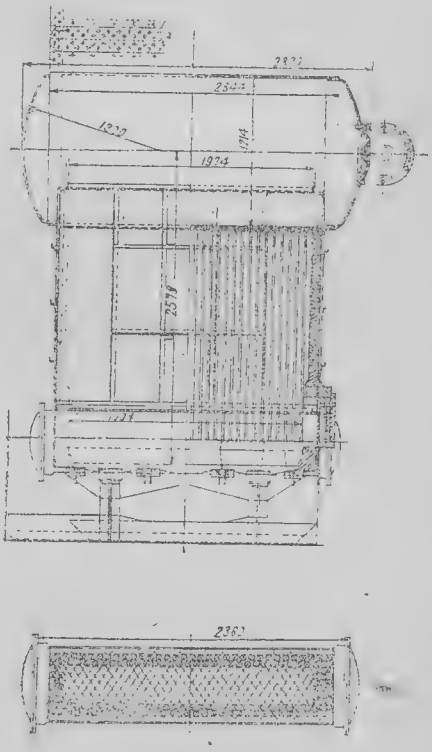


Рис. 199а. Котел Ярроу.

труб только средние ряды их входили в коллекторы перпендикулярно к трубным доскам, а остальные трубки входили в коллекторы под косым углом, т. е. крепились косой развальцовкой. Чтобы получить необходимую надежность крепления труб в трубных досках, приходилось производить развальцовку труб в коллекторах под углом, близким к прямому. Это достигалось ограничением числа рядов труб в пучке и увеличением радиуса изгиба трубных досок. Для уменьшения диаметра водяных коллекторов Ярроу предложил выполнять их не цилиндрическими, а из листов, согнутых по разному радиусу, а именно трубная доска изгибалась по радиусу, значительно большему, чем остальная часть цилиндра.

Для избежания появления течи в трубных досках из-за жесткости соединений коллекторов прямыми трубами рекомендовалось разводку и прекращение паров производить сравнительно медленно (примерно 1 ч.).

В последующих конструкциях Ярроу начал отказываться от разъемных коллекторов и стал делать их клепаными. Делал он это постепенно. Сначала он ставил только паровой клепаный коллектор, а водяные коллекторы попрежнему выполнялись разъемными (рис. 198). В 1897 г. Ярроу вовсе отказался от производства разъемных коллекторов (рис. 199, 199a, 199b). Чтобы облегчить замену поврежденных кипятильных трубок новыми, Ярроу в новых конструкциях котлов увеличил диаметр парового коллектора.

На рис. 200 показан способ вставки трубки в коллектор котла. Если, например, надо поставить трубку *GH* на место, то сначала заводят верхний конец трубки в самое крайнее отверстие парового коллектора *A* настолько, чтобы можно было вставить нижний конец трубки в отверстие *B* водяного коллектора. Затем трубку опускают

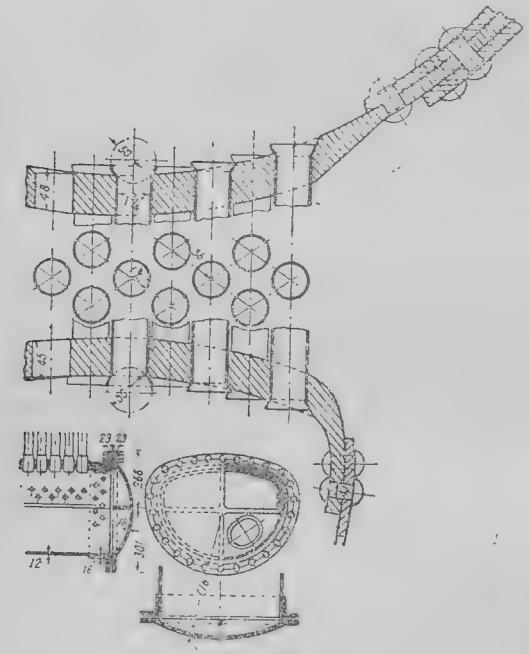


Рис. 199b. Элементы котла Ярроу.

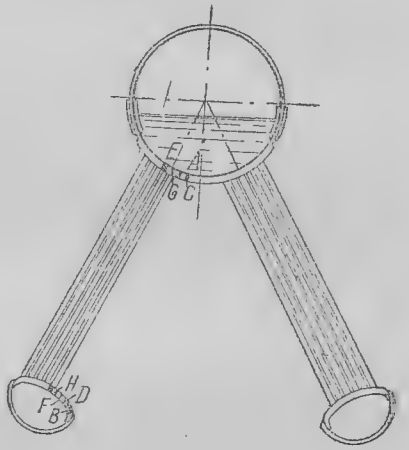


Рис. 200. Способ вставки трубок в котле Ярроу.

в водяной коллектор настолько, чтобы можно было переставить трубку верхним концом в отверстие *C* парового коллектора и т. д. Таким образом трубка последовательно ставится в положения *CD*, *DE*, *EF*, *FG* и, наконец, в положение *GH*. Вынимается трубка обратным путем, причем предварительно удаляются находящиеся перед ней трубки. Замена трубки среднего ряда продолжается около двух часов.

Особенность котлов Ярроу новой конструкции — отсутствие циркуляционных труб. Это мероприятие, правда, несколько ухудшало циркуляцию воды в котле, но тем не менее она была достаточной, так как при нагрузках котла, считающихся тогда нормальными, гидравлические сопротивления в трубках были невелики.

В котлах Ярроу, появившихся в конце 90-х годов, питание котла водой производилось не в паровой коллектор, а в специальные выгородки водяных коллекторов, откуда вода поступала по последним 2—3 рядам кипятильных трубок в паровой коллектор. Эти трубки могли считаться экономайзером, так как в них происходило не испа-

рение, а лишь подогрев питательной воды. Циркуляция воды в котле происходила помимо этих трубок. Такое питание котла позволило значительно повысить тепловосприятие труб, через которые происходило питание котла, так как увеличивалась разность температур газов и воды в этих трубках. По опытным данным, последние два ряда подогревательных трубок воспринимали примерно столько же тепла, сколько предыдущие шесть рядов труб (табл. 65).

Таблица 65

Перепад температур газов в °Ц

Кипятильные трубки	Трубки подогревателя
11, 12, 13, 14, 15, 16 ряда	17 и 18 ряда
600—500	500—400

Многие утверждали, что ввод питательной воды в нижний коллектор вызывает коррозию задних рядов трубок. Эксплоатационные же наблюдения показали почти полное отсутствие коррозии в трубах, выделенных выгородкой. Это можно объяснить тем, что подогрев воды в данном пучке труб, вероятно, не доходил до той температуры, при которой начиналось выделение воздуха из воды. Кроме того, движущаяся по этим трубкам вода могла смывать выделившиеся пузырьки воздуха.

Котлы Ярроу, поставленные на английских минных крейсерах типа «Swordfesch», были подвергнуты испытаниям, которые дали следующие основные характеристики котла.

На каждом крейсере стояло по 8 котлов, суммарная поверхность нагрева которых составляла 725 $м^2$.

Площадь колосниковой решетки . . . . . 15 $м^2$
Полный вес котлов . . . . . 62 *т*
Мощность машин . . . . . 455 *и. л. с.*

На 1 *т* веса котла приходилось 73 *и. л. с.*, т. е. примерно столько же, сколько и у котлов Торникрофта и Нормана.

Применение прямых трубок в котлах Ярроу придало им следующие основные преимущества:

1) взаимозаменяемость кипятильных труб, что позволяло на складах и судах держать необходимый запас стандартных по длине и диаметру труб;

2) меньшие гидравлические сопротивления;

3) легкость наружного и внутреннего осмотра и очистки трубок;

4) малая вероятность повреждений и простота ухода за котлами.

В процессе эксплоатации котлов Ярроу выяснилось, что прямизна трубок обусловливала появление в котле ряда существенных недостатков в сравнении с котлами с изогнутыми трубками.

Основные из них следующие:

1. Возможность размещения, при одинаковых размерах коллектора и пучка трубок, меньшей поверхности нагрева по сравнению с котлами с изогнутыми трубками.

2. Невозможность свободного расширения кипятильных трубок, что вызывало при повышении нагрузки появление течи в местах раз-

вальцовки труб и поворачивание водяных коллекторов вокруг своей оси.

В связи с этим, в котлах Ярроу допустимая форсировка котла определялась напором воздуха в зольник лишь в 30 *мм* вод. ст. против 80 *мм* вод. ст. у котлов Нормана.

Эти недостатки считались терпимыми примерно до конца 90-х гг., т. е. до тех пор, пока не потребовалось увеличить примерно до 35 узлов скорость минных крейсеров, на которые часто устанавливались котлы Ярроу. Такое увеличение скорости хода было связано со значительным повышением форсировки котла. Последняя в котлах Ярроу ограничивалась невозможностью свободного теплового расширения прямых трубок. Ярроу на пороге XX в. отказался от исключительного применения прямых трубок и начал придавать им небольшой изгиб. Котлы Ярроу получили весьма широкое распространение во флоте. К концу XIX в. они даже выдвинулись в число ведущих типов котлов для военных судов (табл. 66).

Таблица 66

Число котлов Ярроу, установленных и строившихся для военных судов до 1900 г. включительно

№ по порядку	Название стран	Число судов	Число котлов	Мощность, развиваемая котлами, в *и. л. с.*
1	Великобритания	20	82	45 000
2	Япония	6	30	40 000
3	Россия	2	6	4 000
4	Австро-Венгрия	9	30	28 000
5	Аргентина	4	24	17 000
6	Голландия	7	66	60 000
7	Китай	1	8	6 000
8	Норвегия	3	24	14 000
9	Португалия	1	12	12 000
10	США	1	4	3 000
11	Швеция	8	22	34 000
	Итого	62	308	263 000

Успеху котлов Ярроу много помогло отечественное покровительство. Как известно, Англия в те годы обладала самым сильным флотом и по праву считалась владычицей морей.

К концу 1900 г. в английском флоте было [1]:

Броненосцев	79
Крейсеров	178
Миноносцев разных типов	236
Остальных судов	56.

Такой большой флот был необходим Великобритании для охраны ее колоний и берегов общей протяженностью в 2590 морских миль. Несмотря на то, что английский флот не только не имел себе равного, но значительно превышал флоты остальных морских держав как по

[1] Составлено по данным «Военные флоты и морская справочная книжка» на 1901 г., стр. 430—497.

числу судов, так и по их мощности, промышленники Англии настаивали на необходимости иметь еще более сильный флот, предвидя, что в недалеком будущем три державы (США, Япония и Франция) будут в состоянии оспаривать морское первенство у Англии.

В 1889 г. лорд Гамильтон проводит в парламенте грандиозную программу судостроения. Одновременно начинается усиленная борьба за повышение тактических свойств военных кораблей.

До 1901 г. на все крейсера I и II классов и броненосцы английское адмиралтейство ставило исключительно бельвилевские котлы, чем наносило весьма чувствительный ущерб как своим отечественным заводам, оборудованным для постройки цилиндрических котлов, так и сталезаводчикам. В стране образовалась сильная партия недовольных введением иноземной системы котлов. Причина была в меньшей экономичности бельвилевских котлов и частых повреждениях в них; последние объяснялись недостаточной подготовленностью эксплоатационного персонала.

Была составлена комиссия [1] из среды заводчиков и пароходовладельцев. Они в первую очередь забраковали бельвилевские котлы и предложили испытать четыре системы котлов: Бабкока и Вилькокса, Никлосса, Дюрра и Ярроу с крупнокалиберными трубами, а временно рекомендовали употреблять цилиндрические котлы, от которых уже начали отказываться в военном флоте, водотрубные же котлы одной из четырех указанных систем предлагали ставить на суда лишь в качестве резерва для развития больших скоростей.

Это предложение было шагом назад в котельной технике, сделанным для поддержания английской промышленности.

Бельвиль пробовал было бороться с натиском английских промышленников против своих котлов, но все было безуспешно. Национальные интересы взяли верх. С их помощью начали получать большое распространение котлы Ярроу.

126. Котлы Филиппса

Стремление сохранить основные преимущества котлов Ярроу (прямизна трубок и хорошая циркуляция воды) и одновременно добиться эластичности труб побудило Филиппса [2] в 1901—1902 гг. сконструировать котел, показанный на рис. 201. Котел Филиппса состоял только из парового коллектора и двух пучков двойных труб. Филиппс отказался от применения водяных коллекторов. В связи с этим каждая кипятильная трубка могла свободно расширяться, не встречая сопротивления соседних. Для защиты нижних концов кипятильных трубок от действия пламени и для сохранения необходимых расстояний между трубками последние пропускались через отверстия специального листа.

Нижние концы трубок заканчивались пробками *b* на резьбе (рис. 202). Отвернув эти пробки, можно было вынуть внутренние трубки для того, чтобы осмотреть и очистить от накипи не только

---

[1] Предварительное донесение английской комиссии по водотрубным котлам и статьи, относящиеся к этому донесению. Париж. Национальная типография, 1902 г.

Report of the Committee appointed by the Lords commissioners of the Admiralty to consider certain questions respecting modern types of boilers for naval purposes. 1902.

[2] Буслей. Судовые водотрубные котлы. Перев. Голова. Стр. 204—205, СПБ, 1898.

внутренние, но и наружные трубки. Для удобства выемки внутренние трубки *а* делались составными из 2—3 частей.

Котел (рис. 201) имел поверхность нагрева 37 *м*². Давление пара в котле поддерживалось 20 *ати*, полный вес котла в готовом для работы состоянии составлял 1 *т*.

Циркуляция воды в данном котле проходила так. В кольцевом пространстве между наружной и внутренней трубкой происходило парообразование. Пароводяная смесь подымалась по этому пространству вверх, а на ее место поступала вода, опускающаяся по внутренней трубке. Циркуляция воды проходила довольно интенсивно, так как во внутренней трубке парообразования почти не происходило, потому что разница температур воды во внутренней трубке и паро-

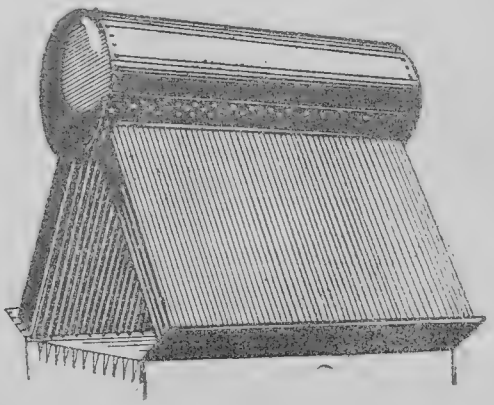


Рис. 201. Котел Филиппса.

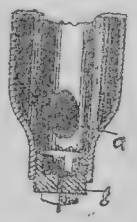


Рис. 202. Конец трубки котла Филиппса.

водяной смеси в кольцевом пространстве труб практически равнялось нулю.

Выгодной особенностью котла Филиппса была возможность свободного расширения труб и относительно хорошая циркуляция воды в котле.

Данный котел имел и очень большие недостатки:

1) невозможность продувания котла во время работы;

2) трудность очистки труб от накипи, обусловливаемая необходимостью вынимать внутренние трубки.

Котлы Филиппса не получили широкого распространения во флоте.

127. Котлы Петерсона — Макдональда [1]

Для увеличения свободного расширения кипятильных трубок Петерсон и Макдональд в своем котле заменили большие водяные коллекторы малыми с большим числом рогообразных трубных секционных камер (рис. 203—203а). Последние соединялись секциями труб с паровым коллектором. Каждая секция (рис. 204) состояла из девяти трубок. Питательная вода поступала сначала в цилиндрический экономайзер, расположенный в топке под паровым коллектором. Из водяного коллектора вода входила по медной трубе в паровой коллектор. Труба питательной воды тянулась в паровом коллекторе примерно на $^2/_3$ его длины. По длине этой трубы был устроен ряд отвер-

[1] Англ. пат. № 23577, 1893 г. VDI, стр. 1267—1268, 1896. Engineer, стр. 366, 1895.

стий для слива воды в коллектор. Для усиления циркуляции котел снабжался четырьмя циркуляционными трубами. Две из них соединяли водяные коллекторы с экономайзером, а две другие служили для соединения водяного и парового коллекторов.

Результаты испытаний котла Петерсона — Макдональда показали, что при сжигании в течение 1 часа на 1 $м^2$ колосниковой решетки 152,6 *кг* стандартного угля каждый килограмм этого угля испарял около 9,3 *кг* пара. Часовая паропроизводительность котла составляла 8,5 *т/ч*, а расход угля в час был равен 910 *кг/ч*.

Испытуемый котел без воды весил 7,5 *т*, вес воды в нем составлял 2,5 *т*. Котел развивал мощность 400 *и. л. с.* На 1 *т* веса котла приходилось всего около 40 *и. л. с.*, т. е. примерно в два

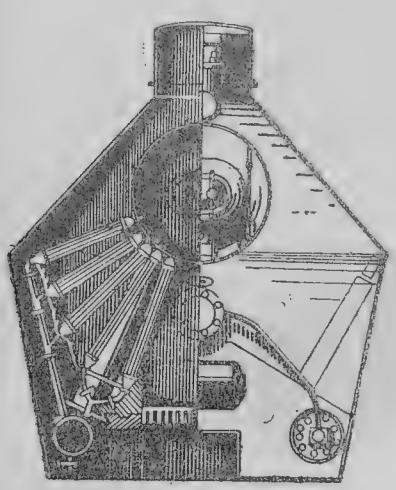


Рис. 203. Котел Петерсона—Макдональда.

Рис. 204. Пучок трубок в котле Петерсона—Макдональда.

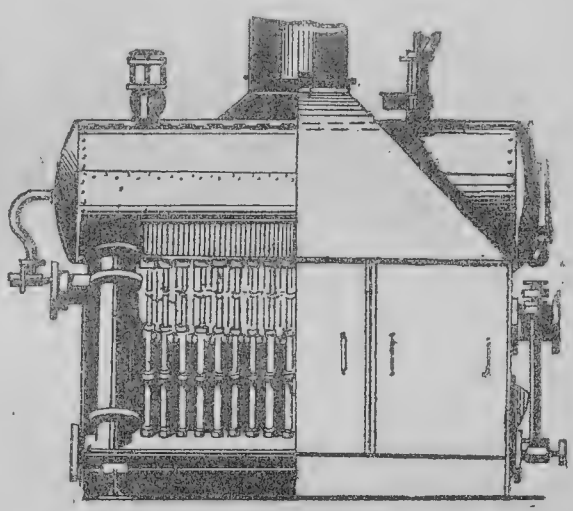


Рис. 203а. Котел Петерсона—Макдональда.

раза меньше, чем у котлов Ярроу, Нормана, Торникрофта и других. Это объяснялось большим весом воды в котле, большими размерами парового коллектора, а также применением сравнительно тяжелых кожухов [1].

Трудность внутренней очистки кипятильных труб от накипи являлась крупным недостатком котлов Петерсона — Макдональда. Они не получили широкого распространения даже в торговом флоте.

Как мы уже отмечали, котлы Бабкока и Вилькокса, Мийабара, Нормана, Ярроу, Торникрофта — Шульца и др. имели много преимуществ по сравнению с цилиндрическими огнетрубными котлами; уступали они последним в отношении к. п. д., а именно средний к. п. д. вышеупомянутых водотрубных котлов был равен 53% против 60% у огнетрубных котлов. Это обстоятельство сыграло главную роль в сохранении огнетрубных котлов как основного типа в коммерческом флоте даже и в начале XX в.

---

[1] Busley. Die Wasserrohrkessel der Dampfschiffe. Zeitschr. d. VDI, S. 1268, 1896.

Низкий к. п. д. водотрубных котлов, вызываемый высокой температурой уходящих газов из-за короткого пути их через поверхность нагрева, на пороге XX в. уже переставал быть терпимым. В связи с этим некоторые изобретатели и в частности Стирлинг при разработке своих котлов основной упор делали на увеличение к. п. д. котла.

КОТЛЫ СТИРЛИНГА

В Германии первый судовой котел Стирлинга[1] был запатентован в октябре 1901 г. Котлы Стирлинга (рис. 205) состояли из трех паровых и одного водяного коллектора, соединенных между собой тремя пучками кипятильных труб, наружный диаметр которых вначале был принят равным 82,5 *мм*. Несколько лет спустя наружный диаметр был уменьшен до 57—51 *мм*. Такое уменьшение диаметра трубок позволяло разместить большую поверхность нагрева, если сохранены одинаковыми: 1) размеры трубных решеток и 2) длина и шаг трубок[2].

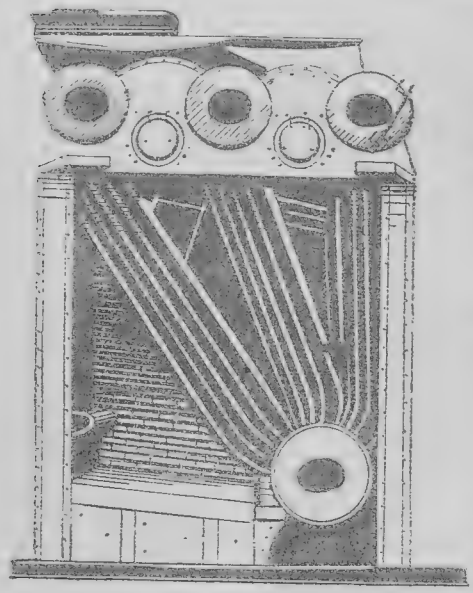


Рис. 205. Котел Стирлинга.

При одинаковом материале трубок и давлении пара в котле уменьшение диаметра труб дает возможность уменьшить и толщину их стенок, а стало быть, и вес 1 $м^2$ поверхности нагрева.

Упомянутые преимущества, связанные с уменьшением диаметра трубок, были связаны с рядом недостатков. Главный из них: большая вероятность зашлаковывания и заноса золой поверхности нагрева. Это обстоятельство указывало на то, что конструкторы при выборе шага и диаметра труб должны учитывать свойства топлива и его золы.

Все кипятильные трубки на концах изгибались настолько, чтобы получить ввод в коллектор под углом 90° (рис. 205а). Это обеспечивало лучшую, чем при косом вводе трубок в коллектор, плотность соединений. При перпендикулярном вводе трубок в коллектор толщина стенок коллектора могла быть меньшей, если при этом сохранены одинаковыми давление пара и размеры коллектора.

Большое преимущество котла Стирлинга — возможность производить наружный осмотр и наружную очистку почти каждой кипятильной трубки. Для этого в кожухе котла было предусмотрено устройство круглых лазов, а пространство между трубными пучками имело такие размеры, что позволяло помещаться нескольким рабочим при производстве замены и осмотра трубок. Между пучками труб были расположены перегородки (рис. 206), направляющие газы вдоль трубок последовательно по первому пучку вверх, по второму

[1] Dietrich. Der moderne Dampfkessel der Kriegs- und Handelschiffe. Стр. 426 - 424, Rostock, 1908.

[2] Шагом трубок называют отношение расстояния между осями трубок к их диаметру

вниз и по третьему снова вверх. Благодаря такому удлиненному газоходу газы успевали значительно понизить свою температуру. Потери с уходящими газами получались не так высоки, как это и показывает табл. 67 важнейших опытных данных котла Стирлинга.

Удлиненный газоход с двумя поворотами газов на 180° вызвал увеличение сопротивлений при движении газов, главным образом, за счет их поворотов. При повороте газов между вторым и третьим

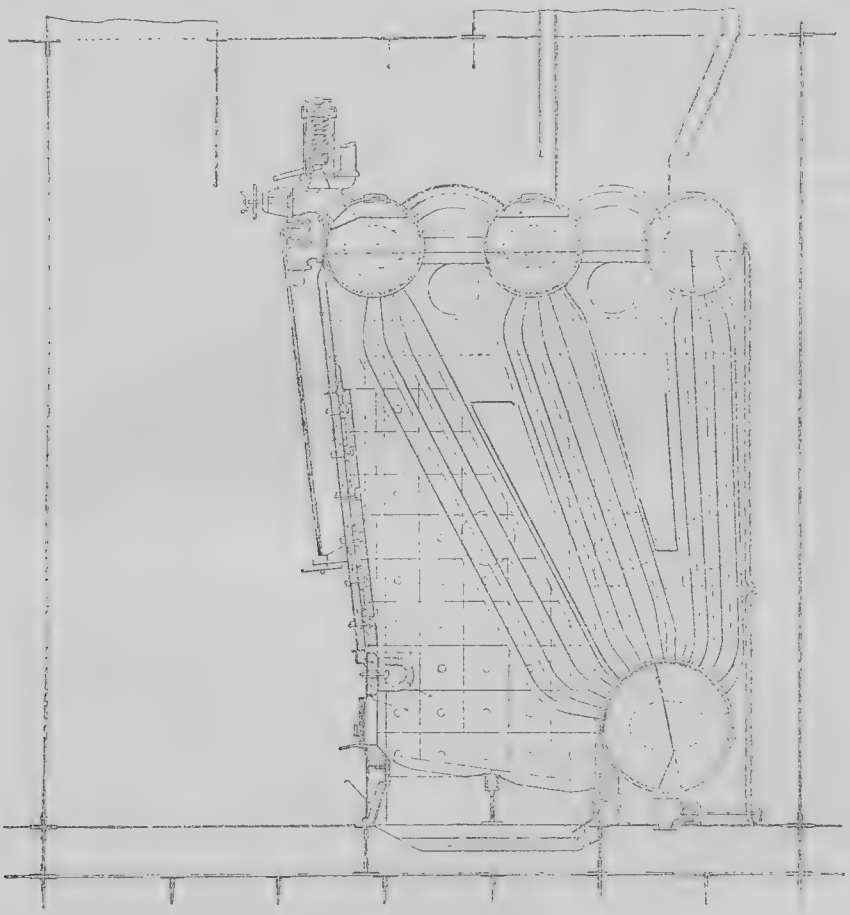


Рис. 205а. Котел Стирлинга.

пучками труб происходило выпадение золы, в результате чего поворот мог оказаться занесенным золой, если не предусмотреть возможности периодического удаления золы струей пара или сжатого воздуха.

В рассматриваемом котле обращает на себя внимание устройство воздушного охлаждения фронтового кожуха. Как показано стрелками на рис. 205, вторичный воздух, вводимый в топку под колосниковой решеткой, проходил через кожух, охлаждая его и наружные стенки кирпичной кладки. Воздух за счет отнимаемого тепла сам нагревался и поступал в воздушные каналы кожуха через специальные дверцы, обозначенные условно на рис. 205 значком *X*.

Таблица 67

Наименование	Обозначение	Размерность	Опытные данные
Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	300—320
Давление в котле	$P_к$	*ати*	14
Температура воды, поступающей в котел .	$t_к'$	°Ц	37
1 *кг* угля испарял *кг* воды	$И_в$	*кг/кг*	8,9
Отношение поверхности нагрева к площади колосниковой решетки	$\frac{H_к}{R}$		48
Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	360
Паронапряжение поверхности нагрева . . .	$\frac{D}{H}$	*кг/м²ч*	55

Подогрев вторичного воздуха в кожухе фронтовой стенки выгоден тем, что он позволяет уменьшить тепловые потери в окружающую среду и кроме того способствует улучшению процесса горения

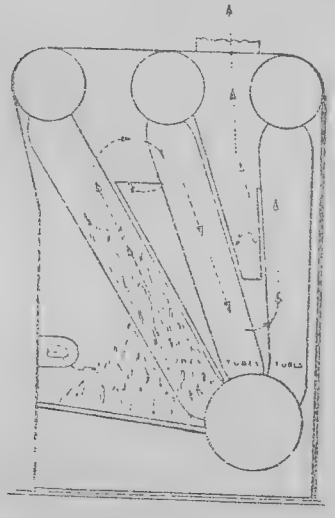


Рис. 206. Схема движения газов в котле Стирлинга.

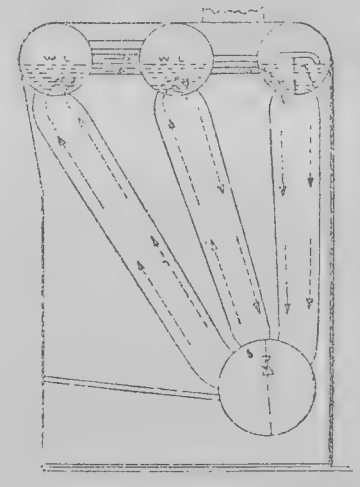


Рис. 207. Схема циркуляции воды в котле Стирлинга.

летучих веществ топлива. В зольник рассматриваемого котла вводилось небольшое количество воды, служащей для охлаждения колосников путем лучевосприятия тепла от них.

В заключение постараемся схематически изложить процесс парообразования и циркуляцию воды в рассматриваемом котле. Питательная вода поступала в задний коллектор (рис. 207, 208), проходя предварительно через два первых коллектора. В последних она успевала нагреться настолько, что воздух, растворенный в ней, выделялся

и удалялся вместе с паром в паропровод. Вероятность коррозии стенок воздухом в этом котле почти отсутствовала.

Под действием теплоты газов часть воды в первом и втором пучке труб превращалась в пар, который подымался в паровой коллектор, увлекая с собой и часть воды. Освободившееся при этом место заполнялось водой, подымающейся из водяного коллектора, куда она могла опускаться из среднего и заднего коллектора.

Наиболее слабым местом в данном котле являлась циркуляция воды (рис. 208). При форсированной работе котла опускание воды в среднем пучке труб иногда тормозилось поднимающимися вверх паровыми пузырьками. В результате вверху среднего пучка труб имели место застои паровых пузырьков.

Усиленное местное парообразование при недостаточном количестве труб, соединяющих паровые коллекторы, могло вызвать местное увеличение давления в среднем коллекторе. Из последнего это давление могло вытеснить воду и даже оголить верхние концы сред-

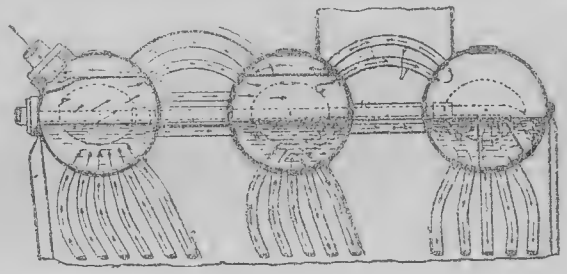


Рис. 208. Схема циркуляции воды к котлу Стирлинга.

него пучка. Все это нередко кончалось пережогом трубок и появлением течи в местах развальцовки их в паровом коллекторе. Высокий к. п. д. рассматриваемого трехпучкового котла породил в нем новые недостатки: слабую циркуляцию воды, увеличение сопротивления движению газов и возможность заноса золой нижних концов труб второго и третьего пучков.

Все указанные дефекты по организации циркуляции в котле Стирлинга при небольших форсировках были мало заметны. Из этого вытекает, что котлы Стирлинга были мало пригодны для военных судов, так как по тактическим соображениям на последних требуется возможность весьма сильно форсировать работу котлов. Из других факторов, оказавших свое влияние на ограниченное применение котлов Стирлинга в судовых установках, следует считать большое число коллекторов, увеличивающих общий вес котла.

Закончим описание судовых паровых котлов конца XIX в. рассмотрением котлов, в которых конструкторы пытались соединить преимущества огне- и водотрубных котлов. Из котлов этой группы интересны котлы Андерсона, Лайола, Штромана и Шарля Бабийо.

КОМБИНИРОВАННЫЕ КОТЛЫ

128. Котел Андерсона — Лайола (Англия)

Андерсон и Лайола[1] построили котел (рис. 209), состоящий по существу из двух типов котлов: двухстороннего цилиндрического огнетрубного и двухкамерного водотрубного. Так как и цилиндриче-

[1] TINA. Стр. 296—308, 1894.

ский и водотрубный котлы ничем не отличаются по своему устройству от уже рассмотренных групп таких же котлов, то на описании этого котла не будем останавливаться.

Один из котлов Андерсона — Лайола, работавший при давлении 12,5 *ати*, имел следующие основные характеристики:

Поверхность нагрева котла — 217 *м*².
Часовой расход топлива — 575 *кг/ч*.
Часовая паропроизводительность котла — 6900 *кг/ч*, полагая $\Delta i = 540$ *кал*.

Паронапряжение поверхности нагрева $\frac{D}{H_к} = 31{,}7$.

Испарительность топлива $И = 12$.
Вес котла на 1 *т* производимого пара — 5,7 *т*.

Весовое напряжение решетки $\frac{B}{R} = 90$ *кг/м*²*ч*.

Площадь колосниковой решетки 6,4 *м*².
Полный вес котла с водой 40 *т*.

На 1 *м*² поверхности нагрева вес котла составлял 184 *кг* против 78 *кг* у котла Нормана.

Котлы Андерсона — Лайола не получили широкого распространения во флоте в основном из-за их большого веса.

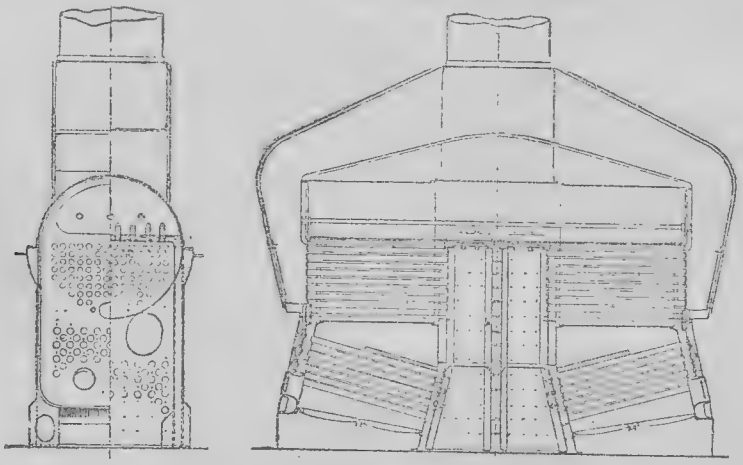


Рис. 209. Котел Андерсона — Лайола.

129. Котлы Штромана (Германия)

Показанный на рис. 210, 210а котел Штромана[1] представлял комбинацию локомотивного котла с камерным водотрубным. Задняя камера водотрубного котла не имела горловин. Развальцовка кипятильных труб в задней камере производилась с фронта котла посредством специального инструмента со стержнем длиною около 2 *м*. Преимуществом котла Штромана по сравнению с локомотивными котлами равной производительности был небольшой вес.

Котел имел тот существенный недостаток, что его часть, состоящая из водотрубного котла, имела слишком жесткие соединения, благодаря чему котел мог давать течи в местах развальцовки труб при резких изменениях паропроизводительности котла. На судах котлы Штромана получили ограниченное применение.

[1] TINA. Стр. 257—266, 1896.

136. Котлы Шарля Бабийо (Франция)

На рис. 211 показан котел Шарля Бабийо [1], который был установлен на нескольких французских миноносцах. Отличительной особенностью этих котлов являлась установка дымогарных труб в кипятильные. Движение дымовых газов показано на рис. 211 стрелками. Циркуляция в этих котлах происходила так. Вода из парового коллектора поступала в заднюю камеру, которая заканчивалась внизу грязевиком. Из камеры вода переходила в кольцеобразные трубы. Образовавшаяся в этих трубках пароводяная смесь поступала через переднюю камеру в паровой коллектор.

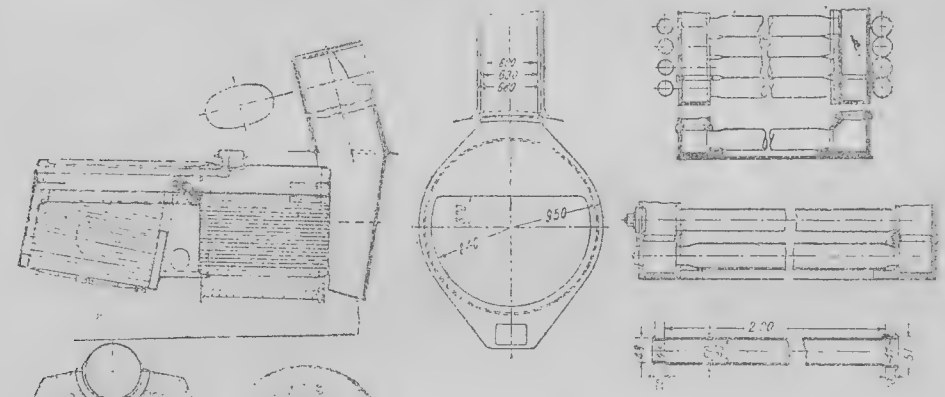


Рис. 210а. Элементы котла Штромана.

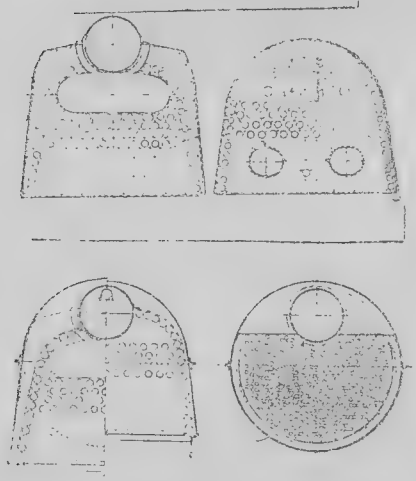


Рис. 210. Котел Штромана.

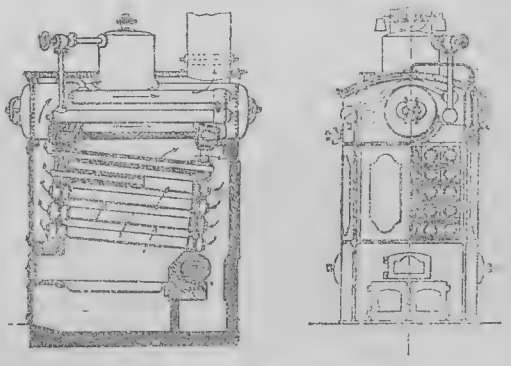


Рис. 211. Котел Шарля Бабийо.

Эксплоатационные наблюдения за циркуляцией показали очень плохие результаты. Пузырьки пара часто задерживались на стенках труб и этим способствовали местному перегреву трубок. Плохая циркуляция не только ограничивала паропроизводительность котла, но и была причиной многих аварий вследствие перегорания нижних рядов трубок. После нескольких таких аварий французское морское министерство забраковало котел.

Таким образом попытка соединить преимущества водотрубных и огнетрубных котлов окончилась неудачей. Все конструкции не получили успешного применения в эксплоатации.

[1] Girard. Chaudières marines. Стр. 286—288, Paris, 1897. Англ. пат. № 16565. 1891 г.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ КОТЛЫ

Паропроизводительность отдельных котлов, в соответствии с требованиями, выдвигаемыми эпохой империализма, была сильно повышена. Так, например, в конце XIX в. средняя паропроизводительность судовых котлов составляла около 10—15 *т/ч*.

Устанавливая такие котлы на суда, не всегда могли использовать их полную паропроизводительность. Наоборот, во время стоянки или кратковременного ремонта судна часовой расход пара, идущий главным образом на бытовые нужды, обычно не превосходил 1—2 *т*. Держать же под парами котлы большой паропроизводительности только для этого расхода было нерационально, так как котел при малых паропроизводительностях работал с крайне низким к. п. д.

Поэтому на некоторых судах устанавливали так называемые вспомогательные паровые котлы [1], служащие исключительно для производства пара давлением порядка 5—6 *ати*, идущего на бытовые нужды, например: отопление, камбуз, бани и т. д. Эти котлы могут работать не только во время стоянки судна, но и во время его хода.

Вспомогательные котлы устанавливаются и на теплоходах, где они также служат для производства пара, идущего на бытовые нужды. В качестве вспомогательных котлов чаще всего применяются цилиндрические оборотные котлы или котлы треугольного типа уменьшенных размеров.

131. Вспомогательный котел парохода «Hungaria» 1884 г. (Германия)

Весьма оригинальная конструкция вспомогательного огнетрубного котла 1884 г. показана на рис. 212. Здесь газовая коробка устроена из полуцилиндрического ящика. Этим устранялись вредные напряжения в корпусе котла, вызываемые наличием газовой коробки, помещенной в водяное пространство котла. При таком устройстве сокращался расход металла на котел и уменьшался его вес.

На других конструкциях огнетрубных вспомогательных котлов мы останавливаться не будем, так как их устройство и работа в основном ничем не отличаются от уже рассмотренных выше цилиндрических оборотных котлов.

В случае, если установка вспомогательных котлов рассмотренного типа не представляется возможной из-за отсутствия достаточной площади, тогда устанавливают так называемые вертикальные (стоячие) котлы.

Котлы эти обыкновенно состоят из корпуса, устанавливаемого вертикально, и огневой коробки, в нижней части которой укладывается колосниковая решетка, а в верхней части ввальцовываются кипятильные трубки. Встречаются конструкции и с дымогарными трубками.

132. Котел Кольтмана, 1885 г.

На рис. 213 показан котел Кольтмана 1885 г. Корпус этого котла состоит из двух цилиндров, вставленных один в другой. Кольцевое пространство цилиндров заполняется водой и паром. В нижней части внутреннего цилиндра, называемого огневой коробкой, располагается колосниковая решетка. Вверху огневая коробка заканчивается дымовой трубой. Нагревательная поверхность котла состоит

[1] Busley. Die Schiffsmaschine. T. I. Стр. 649—656. Kiel u. Leipzig, 1901.

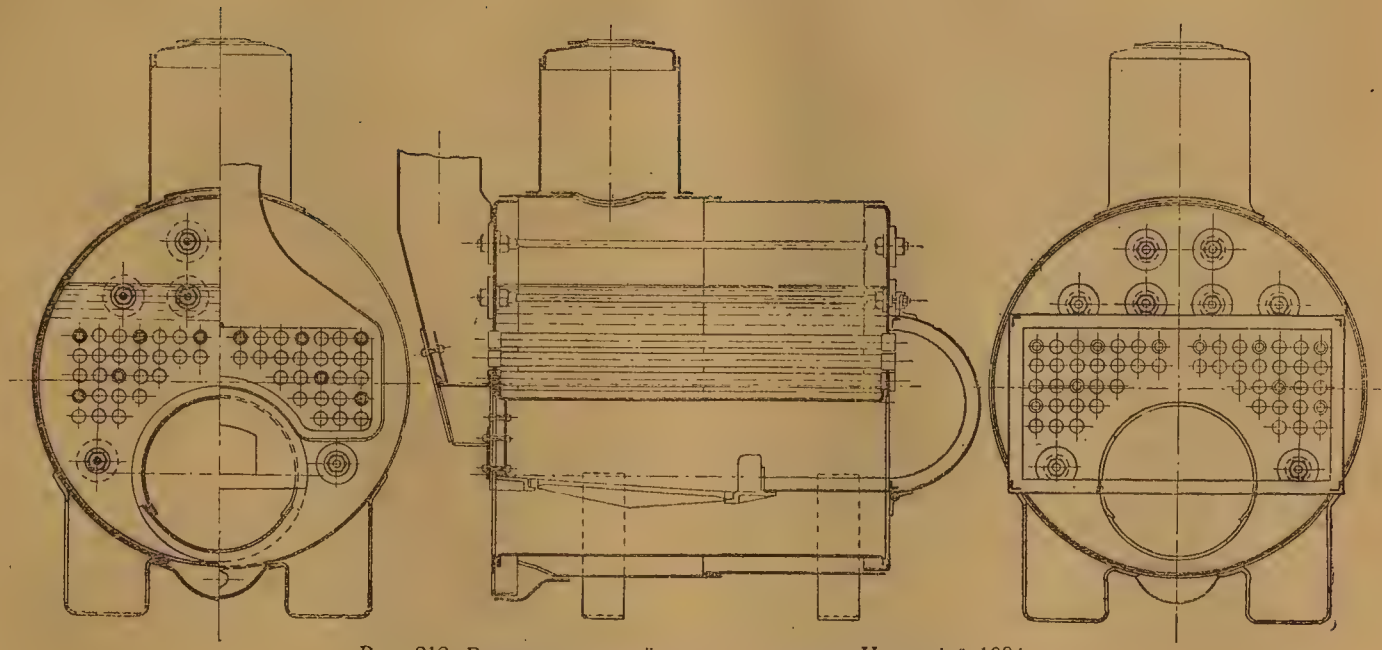


Рис. 212. Вспомогательный котел парохода „Hungaria" 1884 г.

из поверхности огневой коробки, двух больших кипятильных труб, приклепываемых к корпусу огневой коробки. Кипятильные трубы здесь расположены горизонтально.

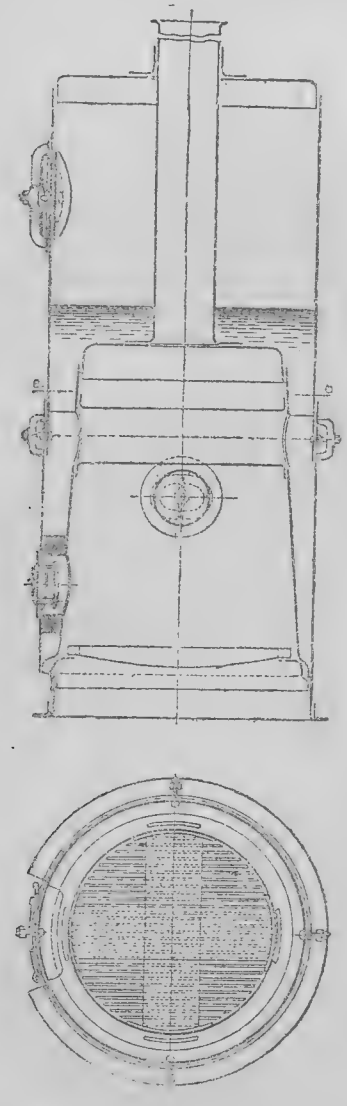


Рис. 213. Котел Кольтмана.

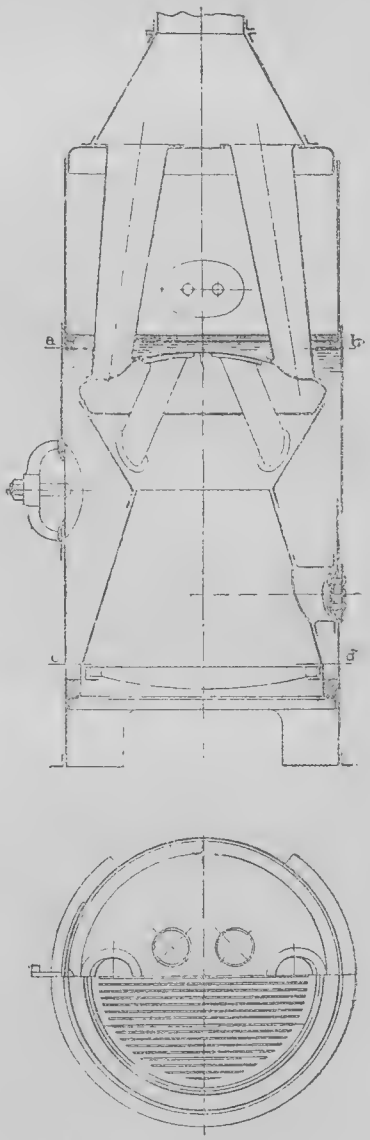


Рис. 214. Котел Гестуса.

В наружном корпусе котла имеется 5 горловин, закрываемых специальными крышками. Наличие этих горловин позволяет производить осмотр и очистку внутренней поверхности котла и кипятильных труб. Максимальная поверхность нагрева котла не превышала 20 $м^2$. В табл. 68 приведены веса и габаритные размеры двух котлов этого типа.

Таблица 68

Поверхность нагрева в $м^2$	Наружный диаметр корпуса в *мм*	Высота котла в *мм*	Вес котла с гарнитурой в *т* для 6 *ати*
10	1200	3165	4,35
20	1500	4200	8,45

Чрезвычайно простое устройство рассматриваемого котла является его выгодной особенностью. Также преимущества его составляли:

1) сравнительно большой объем топки;

2) небольшая площадь, занимаемая им. Эти котлы могут устанавливаться в очень небольших и тесных помещениях.

Однако, котлы системы Кольтмана имеют и свои недостатки:

1. Большой вес котла (как видно из табл. 68, вес котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева колеблется в пределах от 435 до 420 *кг* против 100—120 *кг* для оборотных цилиндрических котлов).

2. Возможность разместить в данных габаритных размерах относительно небольшую поверхность нагрева.

3. Плохие условия для циркуляции воды: горизонтальное расположение кипятильных трубок.

Благодаря этим недостаткам котлы получили ограниченное применение.

133. Котел Гестуса

Недостатки котла Кольтмана были частично уменьшены в котле Гестуса (Gestus'a) (рис. 214) 1885 г., в котором для лучшей циркуляции воды кипятильные трубки располагались наклонно. Все остальные характеристики котла, как вес, габаритные размеры и др., примерно такие же, как и у предыдущего.

В связи с указанными недостатками другие конструкторы при разработке своих котлов главный упор делали на уменьшение веса и габаритных размеров. Одновременно они старались сохранить хорошие качества вышерассмотренных котлов, как-то: простоту устройства, возможность внутренней и наружной очистки, хорошую циркуляцию и сравнительно большой объем топки.

На нижеописываемых конструкциях вспомогательных котлов мы покажем, в какой степени в них удалось удовлетворить вышеизложенным требованиям.

134. Котлы Коломбье (Colombier), 1880 г. (Франция)

Для увеличения поверхности нагрева Коломбье применял в своих котлах вместо 2—4 кипятильных труб большого диаметра 42 трубки малого диаметра (рис. 215).

Трубки вводились в корпус под углом, близким к прямому, для чего они изгибались по небольшому радиусу. Это делалось для получения большей плотности соединения. Для усиления циркуляции воды водяное пространство, ограничиваемое цилиндрической частью внутреннего и наружного корпуса, разделялось тонкостенным цилиндром на две части: наружную и внутреннюю. Вода из наружной части водяного пространства поступала в кипятильные трубки через особые насадки. Образовавшаяся в трубках пароводяная смесь выхо-

дила во внутреннее водяное пространство и в нем поднималась вверх. Одновременно по этому же кольцевому пространству поднимались пузырьки пара, образующиеся на поверхности нагрева внутреннего корпуса котла. Часть внутреннего пространства, освобождаемого пузырьками пара и увлекаемой ими воды, заполнялась водой, поступающей сюда из наружного водяного кольца через нижнюю кромку

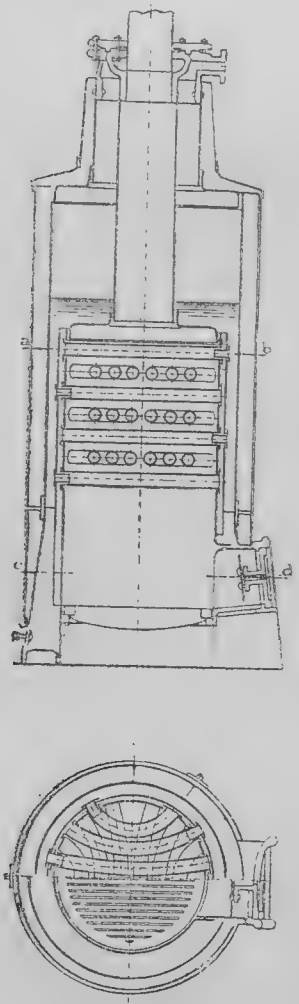


Рис. 215. Котел Коломбье.

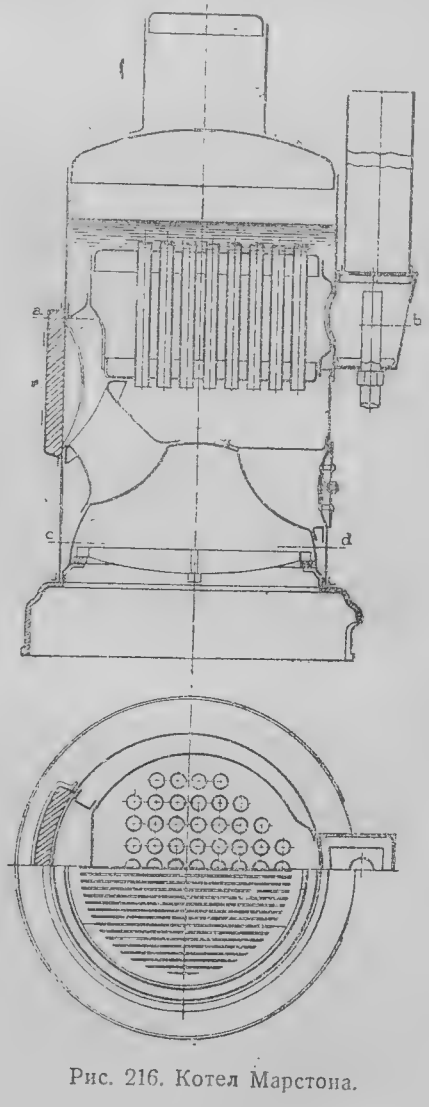


Рис. 216. Котел Марстона.

тонкостенного цилиндра. Таким образом, вода во время работы котла двигалась по двум циркуляционным кольцам.

1. Опускание воды по наружному водяному кольцу и поднятие пароводяной смеси по внутреннему.

2. Опускание по наружному — движение по кипятильным трубкам — и поднятие по внутреннему кольцу.

Для возможности осмотра и очистки внутренних поверхностей нагрева предусматривалось поднятие вверх наружного корпуса котла, для чего последний делался разъемным по кольцу над топочными

дверцами. Перед поднятием корпуса необходимо было отвернуть болты на упомянутом кольцевом соединении и у верхней крышки котла.

Эксплоатационные наблюдения за работой этого котла показали, что котел работал вполне надежно лишь при низких давлениях пара, а при повышенном давлении и при частых форсировках работы котла кипятильные трубки довольно быстро давали течь. Искусственная организация циркуляции воды здесь мало помогала.

135. Котлы Марстона (Marston), 1882 г. (Англия)

Больших успехов в увеличении поверхности нагрева котлов данного типа при одновременном уменьшении габаритных размеров достиг Марстон. Поверхность нагрева рассматриваемого котла состояла из поверхностей полушаровой топки, конического дымохода и цилиндрической газовой коробки вместе со вставленными в нее кипятильными трубками (рис. 216).

Для наружной очистки и осмотра этих труб предусматривалось устройство лаза, закрываемого во время работы котла шамотной крышкой. Для возможности вести форсированную работу котла в основание дымовой трубы устанавливался и пускался в действие паровой форсун. Основным недостатком этого котла является отсутствие лаза внутрь его для производства осмотра и очистки кипятильных трубок.

136. Котел Шухова (Россия)

Котлы Шухова[1] (рис. 217) получили в России очень большое распространение в начале XX в. Для характеристики котла мы приводим его основные размеры (табл. 69). Диаметр кипятильных трубок у котлов Шухова принимался равным 51—76 *мм*.

Таблица 69

Поверхность нагрева в $м^2$	Высота котла в *мм*	Наружный диаметр котла в *мм*	Вес котла с топочной гарнитурой для угольного отопления в *кг*
10,22	2360	1050	3560
19,5	3360	1180	5300
40,0	4060	1575	10600

Достоинством этих котлов была возможность установки их в очень тесных помещениях. Кроме того котлы Шухова имели относительно небольшой вес $\frac{G_к}{H_к}$; как видно из табл. 69, он колеблется примерно от 350 до 250 *кг* против 430 *кг* у котлов системы Кольтмана.

Отрицательной стороной котлов Шухова является необходимость иметь большое количество лючков для осмотра и очистки кипятильных труб, требующих тщательного ухода за ними. С этой точки

[1] Предтеченский А. А. Конструкция стационарных паровых котлов русского изготовления. Изв. ВТИ, № 4 (17), 1926. Стр. 1—83.

зрения некоторыми преимуществами по сравнению с рассмотренными здесь двумя котлами являются котлы с дымогарными трубками, к описанию которых мы и перейдем.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ КОТЛЫ С ДЫМОГАРНЫМИ ТРУБКАМИ

На рис. 218 показан вспомогательный котел с дымогарными трубками. Отличается он от котлов Шухова, Кольтмана и других главным образом тем, что в нем вместо кипятильных трубок развальцованы вертикальные дымогарные трубки. Для осмотра и очистки дымогарных трубок в дымовой коробке имеется лаз; для очистки поверхности нагрева от накипи в наружном корпусе цилиндра имеется горловина, закрываемая крышкой. Надо заметить, что эти котлы мало практичны в отношении внутренней очистки труб.

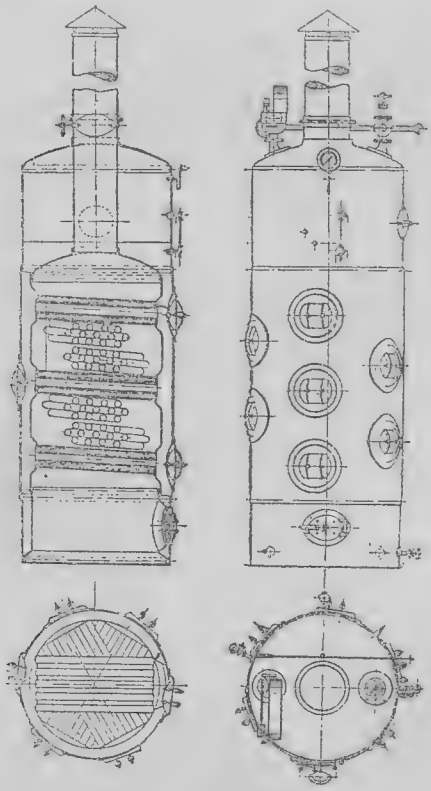


Рис. 217. Котел Шухова.

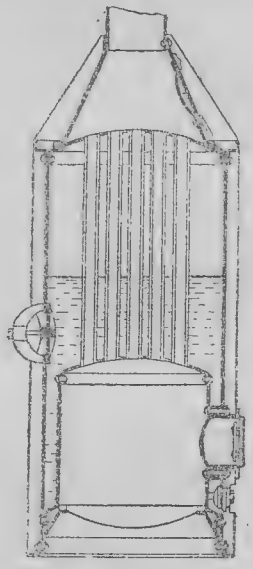


Рис. 218. Вспомогательный котел с вертикальными дымогарными трубками.

137. Котел Кохрана, 1886 г. (Англия)

Как видно из рис. 219, отличительной особенностью котла Кохрана[1], предложенного в Англии в 1884 г., является горизонтальное расположение дымогарных труб. Огневая коробка котла имеет полусферическую форму. Из топки газы направляются через патрубок в огневую коробку в дымогарные трубки. Пройдя последние, газы уходят в дымовую трубу. Дымовая коробка котла снабжена дверцами для осмотра и очистки дымогарных труб.

Плоские стенки котла (рис. 219) крепятся к наружному корпусу посредством листовых связей. Котлы Кохрана отапливались либо углем, либо мазутом. На теплоходах, кроме нефтяных форсунок, они

[1] Англ. пат. № 11051, 1884 г.

снабжались специальным устройством для использования теплоты газов, отработанных в двигателе внутреннего сгорания.

Один из важнейших недостатков этих котлов — небольшой объем топки. Этот недостаток был значительно уменьшен в нижеописываемых вспомогательных котлах, как, например, в котлах Судостроительного общества в Фленсбурге и котлах Clarke, Chapman & Co.

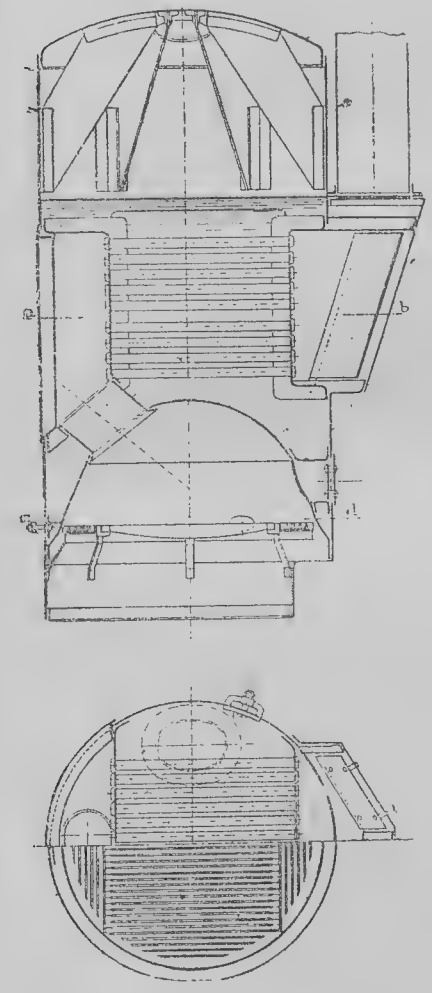


Рис. 219. Котел Кохрана.

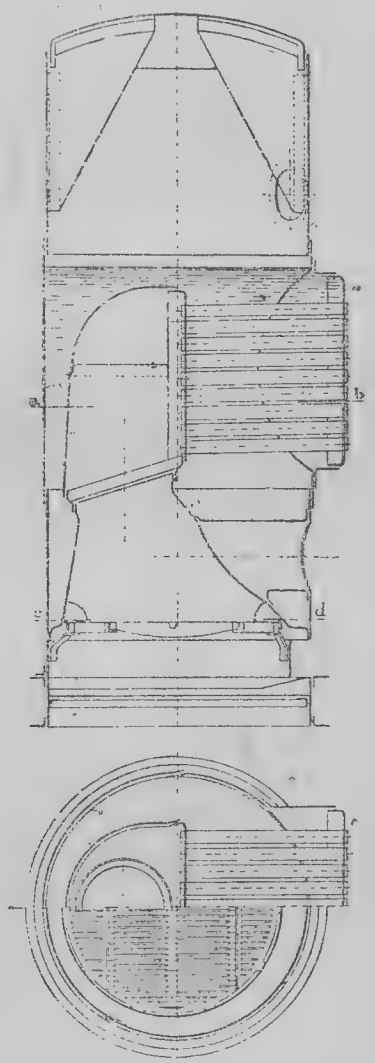


Рис. 220. Котел Судостроительного об-ва в Фленсбурге.

138. Котел Судостроительного общества в Фленсбурге

Устройство котла Судостроительного общества в Фленсбурге, разработанного в 1886 г., ясно видно из рис. 220. Топка в данном котле значительно просторнее, и кроме того технологический процесс изготовления корпуса этой топки проще, так как она имеет коническую, а не полусферическую форму. Рассматриваемый котел, как и предыдущий, изготовлялся из железных листов. В эксплоатации данный котел зарекомендовал себя очень хорошо.

139. Котел Кларка Чэпмэна и Ко (Clarke Chapman & Co), 1877 г.

Котел Кларка Чэпмэна 1887 г. весьма сходен с предыдущим котлом (рис. 221). Отличается он от последнего главным образом тем, что изготовлен из стальных листов, и его дымогарные трубки для улучшения циркуляции воды имеют небольшой уклон.

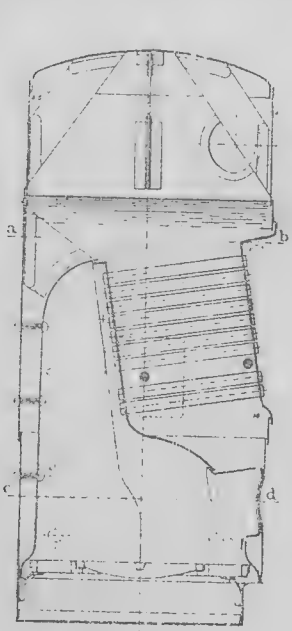


Рис. 221. Котел Clarka Chapman.

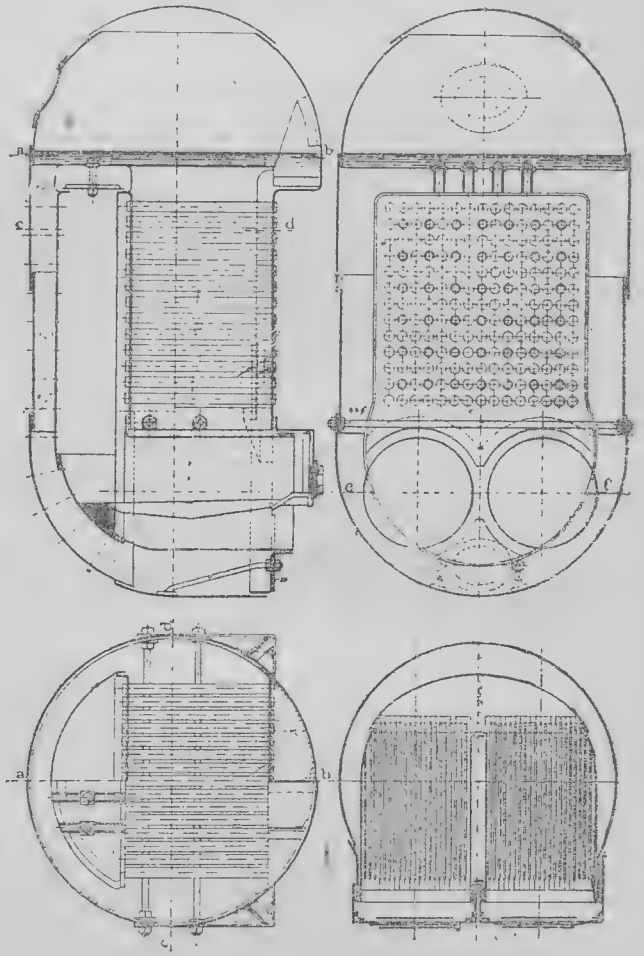


Рис. 222. Котел Fairfield Shipbuilding в Глазгове.

140. Котел Ферфильда (Fairfield Shipbuilding) (Шотландия)

По внешнему виду котел Судостроительного общества Ферфильда в Глазгоу напоминает собой оборотный газотрубный котел (рис. 222). Отличается он от последнего тем, что цилиндрический корпус его располагался не параллельно дымогарным трубкам, а перпендикулярно.

От предыдущих котлов данный котел выгодно отличается тем, что при одинаковых габаритных размерах в нем представляется возможным разместить примерно в 1,52 раза большую поверхность нагрева площади колосниковой решетки. Эти котлы завод поставлял, главным образом, для больших почтовых пароходов.

141. Котлы Кларксона

На рис. 223 показана весьма оригинальная конструкция котла Кларксона [1]. Нагревательной поверхностью в основном служит большое количество наперсткообразных трубок, развальцованных по радиусу во внутреннем цилиндре котла. Кольцевое пространство конвекционного пучка труб заполняется цилиндрической трубкой, в которой может подогреваться питательная вода.

Для улучшения циркуляции воды в котле против трубной доски устанавливается кольцевой щит. Благодаря такому устройству более холодная вода опускается по наружному кольцевому пространству и вступает внутрь кольцевого пространства. Из последнего вода распределяется по наперсткообразным трубкам и частично превращается в пар. Пузырьки пара, выходя из трубок, увлекают с собой и часть воды, подымаясь вместе с ней по внутреннему кольцевому пространству. Выйдя из последнего, пузырьки пара проходят в паровое пространство, а увлеченная с ними вода снова опускается вниз по наружному кольцевому пространству. Такое круговое движение выделенного объема воды будет происходить до тех пор, пока последний полностью не испарится.

Этот котел, как и предыдущий, может отапливаться мазутом или отходящими газами. При работе двигателей отопление происходит отходящими газами, а при остановке двигателя котлы переводятся на мазутное отопление. В котлах с топками, приспособленными для отопления нефтью или газом, имели место частые аварии. В дальнейшем отказались от смешанного отопления данных котлов и стали устанавливать два котла: один из них под нефтяное отопление, а другой под отопление отработанными в двигателе газами. Котел с мазутным отоплением пускался во время остановки главных двигателей.

Котлы Кларксона рассчитывались на рабочее давление от 5 до 6 *ати*. Температура газов при входе в котел была равной 300—370°, а при выходе из него — около 220° Ц. Расход пара в этих котлах на 1 *и. л. с. ч* двигателя составлял 0,25—0,30 *кг*. Котлы Кларксона имеют сравнительно широкое распространение и в настоящее время.

142. Котел Круппа (Германия)

Рассмотренный выше котел Кларксона имел тот важный недостаток, что подвальцовка наперсткообразных труб была в нем чрезвычайно затруднительной, так как для этого приходилось разбирать весь корпус котла. С этой точки зрения значительными преимуществами обладал утилизационный котел, построенный заводом Круппа [2] для товаро-пассажирского теплохода (рис. 224), оборудованного двухтактными двигателями мощностью каждый в 1750 *и. л. с.* Котлы предназначались для парового отопления, подогрева топлива в дежурных цистернах, а также для тушения пожаров в трюмах и бункерах. Каждый котел включался в общую магистраль отработанных газов и мог выводиться из действия при помощи разобщительных клапанов.

[1] В США заявлен патент 2/VI 1911 г. Нем. пат. № 439401, 1927 г. № 449740, 1927 г. Англ. пат. № 262864, 1925 г. Гусев. Судовые паровые котлы. Стр. 250—260. Ленинград, 1934.

[2] Гусев. Судовые паровые котлы. Стр. 260—261. 1934.

Для более ясного представления о работе этого котла приводим основные данные о нем:

Поверхность нагрева котла	55 $м^2$
Рабочее давление пара	8 *ати*
Общее число трубок	187 шт.
Диаметр простых трубок	48/42 *мм*
Диаметр связных трубок	48/36 *мм*
Вес котла без воды	3,3 *т*
Вес воды в котле	0,6 *т*
Паропроизводительность котла	400 *кг/ч*
Часовой съем пара с 1 $м^2$ поверхности нагрева	7,3 $кг/м^2ч$
Вес котла с водой на 1 $м^2$	71 $кг/м^2$
Вес котла с водой на 1 *кг* пара	9,75 *кг/кг*

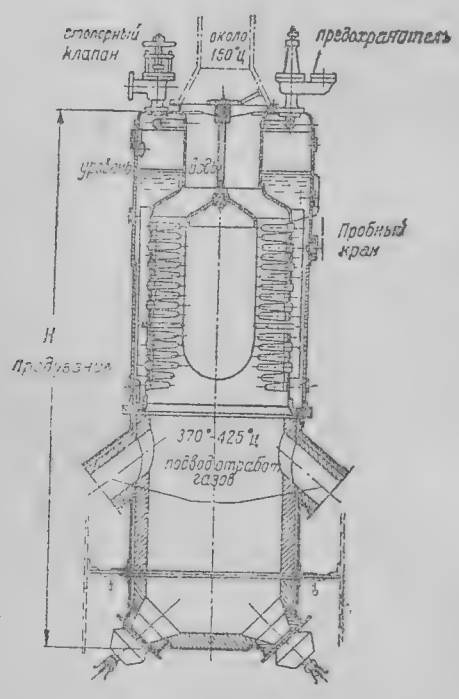


Рис. 223. Котел Кларксона.

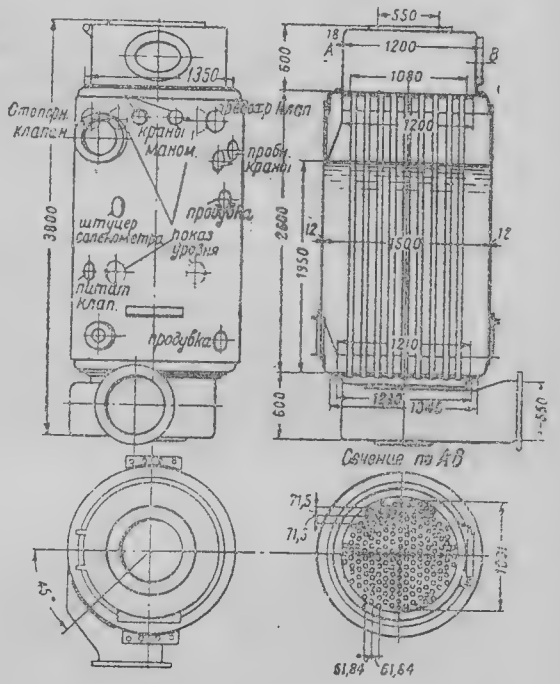


Рис. 224. Котел Крупна.

Общим недостатком всех рассмотренных выше вспомогательных котлов является их относительно большой вес и невозможность разместить в них топку достаточных размеров а потому там, где позволяет площадь, устанавливаются котлы либо шотландского типа, либо треугольного типа.

ВЫВОДЫ

1. За последние тридцать лет XIX в. капиталистические государства особенно усиливают строительство военного флота как одного из технических средств империалистической политики. Именно в эти годы, в условиях быстро развивающихся монополий, особенно обостряется борьба за господство на мировых морских путях. Вступление капитализма в высшую и последнюю фазу его развития повело к бешеной гонке вооружений, к созданию мощных, опоясанных броней кораблей с большой скоростью хода и с неслыханной ранее по мощно-

сти артиллерией. И военный и торговый флот выдвинули в условиях империализма новые и ответственные требования к судовым машинам и котлам.

2. В борьбе за морские пути отдельные державы прилагают усилия для освобождения от иностранной зависимости, стремясь по возможности все элементы судостроения, в особенности котлы и машины, производить своими силами. Следствием этого было усиленное развитие конструкторской и изобретательской деятельности по судовым котлам, сотни вариантов которых предлагают, патентуют и испытывают в различных странах. С целью поощрить собственное судовое котлостроение начинает широко применяться система покровительства изобретений.

3. Именно в последней трети XIX в. наблюдается усиленный как количественный, так и качественный рост военного флота. Весь технический опыт и все технические возможности мобилизуются для развития судовых механизмов. Все это диктуется стремлением отдельных капиталистических стран сделать выше, чем у других, тактические свойства своего флота (сокращение срока приготовления котлов и машин к действию, увеличение быстроходности судов и др.).

4. Первые опыты применения водотрубных котлов на судах (70-е гг.) дали для того времени весьма хорошие результаты. Это вызвало большой спрос на водотрубные котлы.

5. Появились сотни изобретений и проектов судовых водотрубных котлов. Из последних более 50 систем водотрубных котлов получили применение на судах.

6. Развитие водотрубных котлов шло почти одновременно по следующим основным группам:

1) котлы типа Бельвиля,
2) котлы камерные,
3) котлы с циркуляционными трубами,
4) котлы секционные,
5) котлы треугольного типа.

7. Многие из котлов этих групп после эксплоатационной проверки забраковывались как не отвечающие требованиям военного флота.

8. Основными техническими причинами брака были:

а) плохая циркуляция в котле,

б) недостаточная эластичность котла,

в) трудность или невозможность внутренней и наружной очистки поверхностей нагрева,

г) невозможность производить быстрое приготовление котла к действию,

д) невозможность форсировать работу котлов.

9. Забракованные котлы сыграли свою роль для развития судового котлостроения. Отдельные их положительные качества использовались в дальнейшем котлостроительными заводами и изобретателями при разработке новых котлов.

10. В каждой группе из множества конструкций вырабатывались котлы, дававшие для определенного отрезка времени вполне удовлетворительные эксплоатационные характеристики. Эти котлы превращались в ведущие системы котлов своей группы. К таким котлам можно отнести:

1) котлы Бельвиля,
2) котлы Лаграфеля д'Аллеста (камерные),
3) котлы Никлосса (котлы с циркуляционными трубками),
4) котлы Бабкока и Вилькокса, Мийабара (секционные котлы).

Таблица 70

Распространение основных систем судовых водотрубных котлов к 1900 г.

Страны	Бельвиля			Торникрофта			Нормана			Ярроу			Никлосса			Лаграфеля д'Аллеста		
	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*
Великобритания	43	850	550	49	230	266	28	116	100	20	82	45	1	8	4	—	—	—
Франция	35	512	300	3	6	4	31	130	155	—	—	—	10	176	116	14	274	165
Япония	14	292	170	6	19	36	4	8	17	6	30	40	7	112	78	—	—	—
Германия	1	12	10	8	39	47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Россия	16	227	100	1	18	23	12	84	48	2	6	4	3	62	39	—	—	—
США	—	—	—	7	19	21	7	25	20	1	4	3	—	—	—	—	—	—
Австро-Венгрия	3	50	33	3	14	13	—	—	—	9	30	28	—	—	—	—	—	—
Италия	1	21	13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	24	14	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	66	60,0	—	—	—	—	—	—
Норвегия	—	—	—	12	24	31	—	—	—	3	24	14	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	22	34	—	—	—	—	—	—
Аргентина	1	21	13,5	—	—	—	—	—	—	4	21	17	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	—	—	—	—	—	3	12	13	1	12	12	—	—	—	—	—	—
Чили	2	34	19	—	—	—	1	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	—	—	—	—	—	—	3	16	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	—	—	—	—	—	1	8	7	1	8	6	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дания	—	—	—	2	16	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	16	7
	116	2025	1309	91	385	447	90	400	382	62	388	323	22	382	251	16	290	172

Страны	Шульца			Рида			Дю-Тампля			Блекиндена			Дюро			В и W			Мийабара		
	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*	Число судов	Число котлов	Мощн., разв. котлами, в тыс. *и. л. с.*
Великобритания	1	4	6,5	20	94	117	2	12	8	5	20	26	1	12	10	2	5	4	—	—	—
Франция	1	4	6,5	—	—	—	11	60	68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	8	5
Япония	32	167	128	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	62	50	—	—	—	—	—	—
Германия	—	—	—	—	—	—	5	12	14	—	—	—	—	—	—	7	43	11	—	—	—
Россия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	32	41	2	8	4	—	—	—	—	—	—
США	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австро-Венгрия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Италия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Норвегия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дания	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1	—	—	—
	34	175	141	20	94	117	18	114	87	13	52	67	9	82	64	10	49	46	1	8	5

5) котлы Ярроу, Дю-Тампля, Нормана, Торникрофта, Шульца и Блекиндена (котлы треугольного типа) (табл. 70).

11. Некоторые из этих котлов просуществовали десятки лет (котлы Бельвиля, Бабкока и Вилькокса, Торникрофта).

12. Длительность применения (живучесть) этих систем котлов отчасти объясняется большими усилиями котлостроительных заводов и изобретателей, направленными на усовершенствование конструкций своих котлов для удержания их в рядах ведущих судовых котлов.

13. В результате систематических улучшений конструкций котлов некоторые из них претерпели настолько сильные изменения, что потеряли почти полностью сходство с первыми своими вариантами (например котлы Бельвиля, Торникрофта, Ярроу и др.). В связи с этим описание в учебниках котлов в их статическом состоянии неправильно. Устройство основных типов котлов необходимо рассматривать, по крайней мере, по двум их вариантам (первоначальный и последний).

14. Из всех водотрубных котлов наиболее надежными в работе и дающими лучшие эксплоатационные характеристики (табл. 71) оказались вертикально-водотрубные котлы Ярроу, Нормана, Дю-Тампля, Шульца и секционные котлы Бабкока и Вилькокса.

15. К концу XIX в., в соответствии с общей тенденцией эпохи империализма к укрупнению агрегатов, мощность судовых котлов весьма сильно выросла.

16. В целях экономии топлива сравнительно небольшое количество пара, потребное на собственные нужды (отопление, бани, камбуз и т. д.) производилось во вспомогательных котлах малой мощности, так как производство пара, идущего на собственные нужды, в котлах высокой мощности нерационально. Мощные котлы при весьма низких нагрузках работают с крайне низким к. п. д.

17. В качестве вспомогательных котлов устанавливались водотрубные и огнетрубные котлы нормальных конструкций и вертикальные (стоячие) котлы.

18. Эксплоатационные и конструктивные характеристики вертикальных стоячих котлов были ниже таких же характеристик у водотрубных и огнетрубных котлов нормальных конструкций.

19. Вертикальные котлы ставились там, где при выборе системы вспомогательных котлов решающим условием была возможность размещения котла на наименьшей площади.

20. Данные таблиц и эксплоатационная проверка работы цилин-

Таблица 71

Характеристика основных систем водотрубных котлов постройки 60—90-х гг. XIX в.

	Обозначение	Размерность	Название судов	Фр. крейсер „Terrible"	Ам. яхта „Anitractic"	„Herfeshoff Bohl"	Яхта „Jersey Lily"	Ам. яхта „El. Primero"	Нем. пароход „Foln"	„Elbing II"	Фр. броненосец „Massena"	Нем. пароход „Torgau"	Фр. миноносец	Англ. кан. лод. „Shelldrake"	Испытывался на стенде в Нью-Йорке	Броненосец „Monterey"	Броненосец „Saschsen"	Крейсер „Friant"	По данным „Dietrich"	Фр. миноносец 20	Фр. миноносец 185	Англ. миноносец „Albatros"	Крейсер „Pegasus"	Русский крейсер „Аскольд"	Англ. миноносец „Конфликт"	„Dietrich", стр. 461	Фр. миноносец № 211—216	„Dietrich", стр. 433	Крейсер „Kaiserin Augusta"
			Год постройки	1894	1878	1878	1888	—	1890	1890	1895	1884	1890	90 гг.	1889	1885	1891	1898	1893	1889	1889	1894	1898	1897	1900	1894	1900	1897	1901	1892
				Бельвиля	Перкинса	Герреншофа прямоточн.	Герреншофа типа Бельв.	Робертса	Гейна	Ориоля	Д'Аллеста	Штеймюллера	Дюона-Бутона Трепарду	В и W	Торникрофта-Маршалла	Уорда (цилиндрич.)	Уорда (секцион.)	Дюра	Никлосса	Мипабара	Дю-Тампля	Нормана	Торникрофта	Рида	Шульца	Уайта	Ярроу	Дю-Тампля Гюго	Стирлинга	Шотландск. 2-стор.
			номера рисунков по тексту										1	10				9	22		18	90	91	20	34	3	62			
Число судов				116							16			49				32	382		114	400	385	94	17	9	388			
„ котлов		тысяч и. л. с.		2025							290			46				64	251		87	382	447	117	135	12	323			
Мощность котлов	N_i			1309							172																		
Ср. констр. и опытн. данные для числа котлов				48	1	1	1	1	1	1	24	1	1	2	1	1	4	1	20		2	—	4	8	9	9	—			8
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*		17,0	22/14	10,5	8,4	14,5	8	—	15	12	—	15	—	0	11	15	15	14	10	14	15	—	17	15	17	15	14	12
Поверхн. нагрева котла	$H_к$	$м^2$		134	58	13,9	19,1	105	96,5	161,9	125	145	—	437	111,5	11,3	275,9	223	108,5	250	82,5	170	370	218	558	348	190	105	120	415
Площ. колосн. решетки	R	„		4,3	1,4	1,14	0,836	3,3	2,5	4,83	4,17	4,83	4,0	11,67	3,02	0,342	6,85	5	3,65	7,1	2,5	3,62	5,85	4	11,9	6,6	3,2	2,3	2,5	12
Диаметр кип. трубок	$\frac{d_н}{d_{вн}}$	*мм/мм*		120/110	76/57	76—51—38	55/50	—	65/59,5	—	85/75	70/60	—	46/	82,5/	—	48/42	82,5/	84/77	60/	25/21	38/33	38/33	—	44/	38/25	25/	25/20	51	63,5/57,5
Мощность котла	N_i'	*и. л. с.*		522	67,7	68,4	—	236	234	280	590	760	1133	1750	360	—	1000	800	472	1000	500	1680	1930	890	2670	1650	1000	—	—	1750
Паропроизводительность котла	D	*т/ч*		3,9	0,52	0,56	0,255	1,75	1,88	2,24	4,73	5,37	9,0	12	3,96	0,17	12,1	9,2	3,45	8,0	4,0	11,5	15,5	7,1	21,3[4]	13,2	8	4,4	6,67	11,5
Паронапряж. пов. нагрева	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м² ч*		29	8,9	40	13,4	17	19,5	13,8	38	37	—	27,5	34	15	44	41	32	32	48,5	67,5	42	33	38[2]	38	42	42	55,6	28
Сожжено ст. угля	B	*кг/ч*		500	83	128	41	—	292	308	500	850	1315	1250	—	21,7	1840	1170	430	1000	—	1285	1990	1120	722		1100	480	750	1320
Вес напряж. кол. решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м² ч*		118	63	112	63	—	117	64	120	176	330	107	—	63	269	234	118	70	—	360	340	280	183	—	342	210	300	110
Расх. угля на 1 *и. л. с.*	$\frac{B}{N_i}$	*кг/и. л. с.*		0,96	1,22	1,87	—	—	1,25	1,1	0,85	1,12	1,16	0,715	—	—	1,84	1,46	0,91	1,0	—	0,77[2]	1,03	1,04	—	-	1,1	—	—	0,755
Вес котла с водой	$G_{к+в}$	*т*		23,4	7,25	0,546	1,356	6	11,134	14,36	18,5	22,5	16,5	48	17,25	0,78	13,85	25,35	15,95	32	5,5	13,3	12,1[3]	23	46,2	27,7	11,1	7,25	-	93,11
Вес котла без воды	$G_к$	„		—	—	—	1,315	—	8,500	9,56	15,75	17,5	14,55	—	—	0,763	11,55	20,1	13,9	26	—	10,6	—	—	39	—	9,0	5,8	-	62,11
Отношение веса котла к весу воды в нем	$\frac{G_к}{G_в}$	*т/т*		17—19	30	—	28	—	3,25	2	6	3,5	7,5	5—6	—	38	5	4,5	6,8	4,33	—	3,9	-	—	5,5	—	4,3	4,0	—	2
Вес котла на 1 *и. л. с. ч*	$\frac{G_к}{N_i}$	*кг/и. л. с.*		—	—	—	—	—	36,4	34	—	—	12,8	26,7	—	—	11,55	26	28,8	26	—	6,3	-	—	14,6	—	9	—	—	41
„ „ с водой на 1 *и. л. с. ч.*	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	„		45	107	8	—	25,4	42,8	51	37	30	14,5	27,5	48	—	13,84	31,6	33,8	32	11	9,	11	26	17	16,7	11,1	6,9	-	62,1
„ „ „ на 1 $м^2$ пов. нагрева	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	*кг м²*		173	125	39	71	57	116	89	149	155	—	110	150	69	50	113	147	128	67	78	44	106	83	80	58,5	69		226
„ „ на 1 *т* пара	$\frac{G_к}{D}$	*кг/кг*		—	—	—	—		4,5	4,27	—	—	1,62	—	—	4,5	0,95	2,25	4,02	3,15	—	9,23	-	—	1,83	—	1,12	-		5,33
„ „ с водой на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*т,т*		6	14	1	5,32	3,4	5,9	6,4	3,9	3,9	1,85	4	4,37	4,6	1,15	2,75	4,6	4,0	1,37	1,16	1,57	3,2	2,17	2,1	1,39	1,65	-	8,0
Ср. вид. испар. топл.	$H_в$	*кг/кг*		7,8	5,3	4,37	6,25	—	6,7	7,25	9,45	6,3	6,7	9,6	-	7,8	6,6	7,85	8	8	9[1]	7,5	7,8	7,7	8,64	—	7,25	9,2	8,9	8,75
Ср. к. п. д. котла	η	%		54	37,5	30	43	—	50	65	43	46	66	—	—	54	45	54	55	55	62	52	54	53	60	-	50	63	61	60,5
Допустимое давление воздуха при форс. раб. котла	ΔS	*мм* вод. ст.		50									50					50	50			80			80		30			

[1] Для кр. „Jurien de la Gravire", см. VDI. Стр. 1175, 1896.

[2] По данным справочника „Военные флоты" 1901 г., стр. 399—400, для 6 эсминцев $\frac{B}{N_i}$ = 1,05—1,13 *кг/и. л. с.*

[3] Все весовые характеристики даны для корабля „Daring", см. VDI. Стр. 1198, 1896.

[4] Dietrich. Der moderne Dampfkessel. Rostock, 1908.

[5] Для русского учебного судна „Okean", см. Dietrich, стр. 450.

дрических и водотрубных котлов окончательно доказали необходимость выбора для военного флота водотрубных котлов.

21. Важнейшим неразрешенным недостатком водотрубных котлов к началу XX в. остался весьма низкий к. п. д. котла ($\eta = 45—55\%$).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К IV ГЛАВЕ

1. Alban E. Die Hochdruck Dampfmaschine. Rostock, 1843.
2. Bauer Dr. G. Berechnung und Konstruktion der Schiffsmaschinen und Kessel. Ein Handbuch zum Gebrauch für Konstrukteure, Seemaschinisten und Studierende. München und Berlin, 1902.
3. Bienaymé A. Les machines marines. Texte et atlas. Paris, 1887.
4. Bieg F. C. Naval boilers. A text-book for the instruction of midshipmen. Annapolis, 1906.
5. Brassey T. A. The naval annual, 1896.
6. Burgh I. P. A practical treatise on boilers and boiler making. London, 1881.
7. Busley C. Die Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten. Berlin, 1892.
8. Busley C. Die Schiffsmaschine, ihre Bauart, Wirkungsweise und Bedienung. B. I. Text und Atlas. Kiel und Leipzig, 1901.
9. Bellens Charles. Traité des chaudières à vapeur. Paris, 1895.
10. Bertin and Robertson. Marine boilers, their construction and working, dealing more especially with tubulous boilers. London, 1898.
11. Busley. Die jüngsten Bestrebungen und Erfolge des deutschen Schiffbaues. Berlin, 1895.
12. Donkin Bryan. The heat efficiency of steam boilers; land, marine and locomotive with tests and experiments on different types. London, 1898.
13. Clergeau M. Guide pratique du chauffeur et du mécanicien sur les bateaux torpilleurs. Paris, 1895.
14. Dalloz P. Un vrai progrès. Générateurs à vapeur inexplosibles de M. L. Belleville. Paris, 1866.
15. Demoulin M. Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Paris, 1895.
16. Dietrich Max. Der moderne Dampfkessel der Kriegs-und Handelsschiffe, seine Konstruktion, Wirkungsweise, Behandlung und Bedienung. Ein Handbuch für Schiffsoffiziere, Konstrukteure und Studierende. Rostock i. M., 1908.
17. Evers H. Steam and the steam engine; land, marine and locomotive. London and Glasgow, 1878.
18. Fairbairn W. Useful information for engineers. London, 1860.
19. Fassel J. Anleitung zum Betriebe und zur Instandhaltung der Schiffsdampfkessel und Schiffsdampfmaschinen, Laibach, 1878.
20. Girard J. B. Traité pratique des chaudièrs marines. Description, entretien, conduite. A l'usage des mécaniciens de la marine militaire, de la marine du commerce et de l'industrie. Paris, 1897.
21. Générateur inexplosible. Brevet, Niclausse, Paris, 1896.
22. Hartig. Aus der Praxis für die Praxis. Bremenhafen, 1908.
23. Hutton W. Steam-boiler construction. A practical handbook for engineers, boiler-makers and steam-users, containing a large collection of rules and data, relating to recent practice in the design, construction and working of all kinds of stationary, locomotive and marine steam-boilers. London, 1898.
24. Lardner D. The steam engine explained and illustrated. London, 1840.
25. Leitfaden für Maschinistenapplikanten der Kaiserlichen Marine. Neubearbeitung der Ausgabe 1890. Berlin, 1895.
26. Ledieu A. Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation. Avec atlas, Vol. 11, Paris, 1865.
27. Martinenq B. Aide-mémoire du constructeur de navires, des machines et chaudières marines, du mécanicien, du navigateur de l'armateur. Instructions et renseignements théoriques et pratiques à l'usage de la marine de guerre, de commerce et de plaisance. Paris, 1891.
28. Montchoisy B.—on de. Cours pratique et théorique des machines à vapeur professé à l'école supérieure de maistrance de la marine. Paris, 1892.
29. Müller W. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktionsprinzipien, Anordnung und Bedienung. Ein Handbuch für Schiffs-Ingenieure und Offiziere der Handelsmarine. Braunschweig, 1908.
30. Parsons H. B. Steam-boilers, their theory and design. London, 1903.
31. Sennet R. The marine steam engine; a treatise, for the use of engineering students and officers of the Royal Navy, London, 1882. 2 edit. London, 1885.

32. Seaton A. E. A manual of marine engineering. London, 1885.
33. Stromeyer C. E. Marine boilers management and construction. London, 1893.
34. Stock U. H. Steam boilers. New-York, 1881.
35. Tompkins A. E. A text-book of marine engineering. 2 edit. Portsmouth, 1904.
36. Traill Th. W. Boilers, marine and land; their construction and strength. A handbook of rules, formulas, tables etc, relative to material, scantlings and pressures. safety valves, springs, fittings and mountings etc 2 edit. London, 1890.
37. Wilda H. Schiffsmaschinen mit besonderer Berücksichtigung der Hilfmaschinen. Leitfaden für Seedampfschiffsmaschinisten zur Vorbereitung auf die Prüfung für den Schulgebrauch und für die Praxis. 3 Aufl. Hamburg, 1903.
38. Report of the Committee appointed by the Lord Comissioner of the Admiralty to consider certain questions respecting modern types of boilers for naval purposes. 1902.

Журнальные статьи к IV главе

1. Engineering. Стр. 93—94, 1879. The Herreshoff torpedo Launch.
2. Engineering. Стр. 463, I—VI 1883. Thornycrof's water-tube boiler.
3. Engineering. Стр. 171—174, I—VI 1885. Engines of the s.s. „Meteor".
4. Engineering. Стр. 60, VII—XII 1887. Boilers.
5. Engineering. Стр. 674, VII—XII 1895. Kadalitsch. Water-tube boilers.
6. Revue industrielle. Стр. 5, 1889. Machines et chaudières à tubes du vapeur torpilleur syst. Du-Temple.
7. TINA. Vol. 37, стр. 267—292, 1896. Watkinson. Circulation in water—tube boilers.
8. TINA. Vol. 37, стр. 261, 1896. Watt. Water-tube boilers.
9. TINA. Vol. 37, стр. 257—260, 1896. Colonel N. Soliani. Compound marine boilers.
10. TINA. Vol. 37, стр. 131, 1896. M. Robinson. The Niclausse waters-tube boiler.
11. TINA. Vol. 41, стр. 332—346, 1899. Yarrow. Some experiments having reference to the durability of water-tube boilers.
12. TINA. Vol. 41, стр. 309—324, 1899. Marshall, F. T. On the boiler arrangements of certain recent cruisers.
13. TINA. Vol. 28, стр. 317—334, 1887. Spyer. The machinery of small boats for ships of war.
14. TINA. Vol. 40, стр. 1—15, 1898. Durston. Recent trials of the cruiser „Diadem".
15. TINA. Vol. 40, стр. 114—124, 1898. Description of some experiments with a water-tube boiler.
16. TINA. Vol. 36, стр. 40—44, 1895. Thornycroft. The influence of circulation on evaporative efficieny of water-tube boilers.
17. TINA. Vol. 30, стр. 271—284, 1889. Thornycroft. Water-tube boilers for war ships.
18. TINA. Vol. 35, стр. 86—112, 1894. Milton J. T. On the present position of water-tube boilers as applied for marine purposes.
19. TINA. Vol. 34, стр. 287—295, 1893. Thornycroft J. T. Circulation in the „Thornycroft" water-tube boiler.
20. TINA. Vol. 35, стр. 296—308, 1894. Milton, J. T. On water-tube boilers.
21. VDI. Стр. 1037—1043, 1082—1088, 1112—1120, 1143—1150, 1169—1177, 1198—1204, 1232—1238, 1267—1277, 1293—1301, 1896. Busley C. Die Wasserrohrkessel der Dampfschiffe. Ergebnisse von Studienreisen in Deutschland, Dänemark, England, Frankreich, Italien und Nordamerika.
22. Engineer, Стр. 366, 1895. Petersen and Macdonald's water-tube boiler.
23. Engineer. Стр. 172, I—VI 1896. The Reed water-tube boiler, tor. cr. „Lightning".
24. Engineering. Стр. 680, 1895. The Haythorn water-tube boiler.
25. Engineering. Стр. 822—823, 1895. The new British cruiser „Terrible".
26. Engineering. Стр. 463—464, 1883. Thornycroft's water-tube boiler.
27. VDI. Стр. 643, 1887, A. de Dion, Th. Bouton u. Ch. Trepardoux. Dampfkessel.
28. American Engineer. Стр. 466, 1895.
29. American Engineer and railroad journal. Стр. 238, 1895.
30. Annual report of the chief of the bureau of steam engineering for the year. Стр. 48, Washington. 1888.
31. Engineer. Стр. 222, VII—XII 1887; стр. 46, VII—XII 1892; стр. 366, VII—XII 1895; стр. 172, I—VI 1896.
32. Engineering. Стр. 72, 127, 365, 462, 1879; стр. 103, VII—XII 1887.
33. Journal of American Society of naval engineers, Washington. Стр. 416, 1890; стр. 115, 127, 1893; стр. 386, 694, 765, 1896.
34. Journal of the Franklin Institute, 1880.
35. Marine engineer. Стр. 8. 1881.
36. Mitteilungen aus dem Gebiete des Seewesens. Стр. 619, 1894; стр. 837, 1895.
37. Proceedings of the institution of civil engineers, London, 1881, 1894, 1895.
38. Report made to the bureau of the steam engineering, 1884, 10/IX.
39. Revue industrielle. Стр. 5, 1889.

40. Revista general de marina, 1888.
41. TINA. Vol. 28, стр. 331, 1887; стр. 271, 1889, 1896.
42. VDI. Стр. 911, 1887; стр. 672, 1889.

Русская литература к IV главе

1. Афанасьев В. И. Практические формулы для судовых механизмов. Статьи из газеты „Котлин", СПБ, 1905.
2. Бауэр Г. Расчеты и конструкции судовых машин и котлов. СПБ, 1905.
3. Биенемэ А. Ф. Морские машины. Курс французск. морск. инженери. училища. Перев. И. Ососов. СПБ, 1892.
4. Буслей К. Судовые водотрубные котлы. Перев. Д. Голов. СПБ, 1903.
5. Буслей К. Новейшие торговые и военные быстроходные паровые суда. Лекции проф. морск. академии в Киле.
6. Голов Д. Современные паровые котлы военных судов. СПБ, 1897.
7. Голов Д. Повреждения на судах и их исправления судовыми средствами. СПБ, 1897.
8. Голов Д. Усовершенствования в судовых механизмах. СПБ. 1898 г.
9. Голов Д. Руководство для управления и ухода за котлами Бельвиля. СПБ, 1897.
10. Гречин Г. Л. Водотрубные котлы с огневой коробкой. СПБ, 1898.
11. Военные флоты и морская справочная книжка за 1897, 1899, 1901, 1904, 1906 гг.
12. Депп Г. Ф. Паровые котлы. СПБ, 1908.
13. Деркаченко И. Судовые водотрубные котлы. Кронштадт, 1915.
14. Домашнев Д. М. Паровые котлы (часть описательная). Курс морского инженерного училища. СПБ, 1910.
15. Зейферт Ф. Паровые котлы и паровые машины. Перев. с нем. Ушаков А. В Москва — Ленинград, 1928.
16. Кошевой Б. В. Паровые котлы. Курс морского корпуса. СПБ, 1914.
17. Перковский П. Описание судовых машин и котлов. СПБ, 1896.
18. Погодин А. Паровые машины. Вып. II. Паровые котлы. СПБ, 1901.
19. Сеннет. Морские паровые машины. Перев. с англ. В. Куприянов. СПБ, 1886.
20. Сеннет Р. и Орам Г. Ж. Морская паровая машина. Перев. с англ. И. Вишневский. СПБ, 1902.
21. Строймейер. Морские паровые котлы. Перев. с англ. Голов Д. СПБ, 1895.
22. Шебалин. О котлах Бельвиля. Сообщение корабельного инженера Шебалина в Обществе морских инженеров в Кронштадте 12/II 1897 г. Литографированная брошюра.
23. Предварительное донесение английской комиссии по водотрубным котлам и статьи, относящиеся к этому донесению. Париж, Национальная типография, 1902.

ГЛАВА V

РАЗВИТИЕ НЕФТЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ НА СУДАХ

ЗАМЕНА УГОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ НЕФТЯНЫМ[1]

Каменный уголь в течение всего XIX в. являлся основным видом топлива в паровом флоте. Это был век торжества каменного угля над другими видами топлива как в судовых, так и в стационарных установках. Каменный уголь в XIX в. считался самым лучшим видом топлива для судовых котельных установок, игравшим огромную роль в развитии парового флота.

Для эксплоатационного персонала отопление каменным углем судовых котлов не представляло больших трудностей, тем более что в начале XIX в. часовой расход угля определялся лишь сотнями килограммов. Например, на американском военном судне «Mississippi» тоннажем в 1788 *т* часовое потребление угля составляло всего около 300 *кг*.

Совсем иначе обстояло дело с угольным отоплением в конце XIX в., когда мощность судов достигала огромных размеров в сравнении с первыми пароходами. Для того чтобы дать представление о размерах судов, строящихся на пороге XX в., приведем нижеследующие данные.

5 июня 1890 г. с верфи Темзенского общества судостроителей был спущен крейсер «Blenheim». Его основные характеристики:

Водоизмещение	9000 *т*
Мощность машин	20000 *и. л. с.*
Скорость хода	22 узла

А 26 июля 1891 г. в Англии был спущен самый мощный для того времени броненосец «Royal Sovereign». Наибольшая толщина броневой защиты у него доходила до 450 *мм*.

Мощность машин	13000 *и. л. с.*
Число цилиндрических котлов	8
Число топок	32
Часовой расход угля	20 *т*
Запас угля	900 *т*
Наибольшая скорость хода	17,5 узла
Вес корабля в полном снаряжении	14150 *т*
В том числе вес главной артиллерии	1400 *т*
Скорострельной	500 *т*
Полный вес брони	4550 *т*
Вес машин, котлов с водой и запасных частей	1100 *т*
Вес одного котла	32,25 *т*

[1] Гулишимбаров С. Т. Нефтяное отопление пароходов, паровозов, постоянных паровых котлов, металлургических, комнатных, кухонных, хлебопекарных и других печей. СПБ, 1894. Ильютевич — доклад, прочитанный 28/II 1911 г. в Императорском обществе судоходства инж.-мех. VDI. Стр. 899—995, 1014—1019, 1037—1044, 1069—1071, 1089—1095, 1109—1116, 1887. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie, T. 16, 1926.

Подать в течение часа вручную 20 *т* угля из угольных ям в котельные и затем с известным искусством забросить его в топки требовало огромного напряжения сил нижней команды. Чрезмерно тяжелая работа кочегаров становилась почти невыносимой при плавании судов в экваториальных странах, когда котельные превращались в пекло. В таких условиях поддержание полного хода зависело не столько от мощности машин, сколько от выносливости кочегаров. Не меньшую трудность представляла также погрузка угля на корабль.

Стоит лишь вспомнить поход эскадры адмирала Рождественского в 1905 г. с громадным караваном угольных транспортников, чтобы представить себе картину сплошной погрузки угля, которая оставила сильное впечатление на всех участников похода. Приемку угля приходилось производить в открытом море и в укромных бухтах нейтральных держав. Если бы не устройство специальных стрел и лебедок, погрузка угля на судах большого водоизмещения продолжалась бы несколько дней. Постановка же на суда стрел вызвала свои недостатки: стрелы и лебедки загромождали верхнюю палубу и увеличивали вес корабля. На военных судах они представляли хорошую мишень для противника. Во время погрузки угля все работы и учения прекращались, и почти весь личный состав корабля в количестве более 600 человек бросался на погрузку. Все орудия, аппараты и механизмы закрывались чехлами во избежание покрытия их угольной пылью.

К концу XIX в. в торговом флоте было сделано много небезуспешных попыток замены угольного отопления нефтяным. Последнее по сравнению с угольным отоплением представляло большие преимущества, а именно:

1. Удобство хранения и транспортирования нефти. Нефть при перегрузке своих качеств совершенно не меняет, в то время как уголь при каждой перегрузке становится примерно на 10% мельче, не говоря уже о трудности поддержания пара на мелком угле и на количественном перерасходе его при отоплении (около 30%). Нефть можно грузить на суда в любое время, днем и ночью, во всякую погоду, в открытом море, на якоре и на ходу.

2. При нефтяном отоплении котлы сохраняются дольше.

В нефти почти нет серы, которая вредно действует на трубки[1]. Также нет необходимости открывать топки, как при угольном отоплении, что вредно действует на прочность материалов и понижает к. п. д.

При нефтяном отоплении совершенно отсутствуют шлак и зола, так что приспособления для удаления их из кочегарки не нужны. При нефтяном отоплении отпадает чистка топок — самая изнурительная работа, при которой всегда падает нагрузка котла.

3. Для обслуживания котлов с нефтяным отоплением требуется значительно меньшее количество команды, чем при угольном отоплении. Например, на больших пароходах на Гамбургской американской линии в конце XIX в. нижняя команда при угольном отоплении состояла из 192 кочегаров и 120 рабочих, а при нефтяном отоплении требовалось всего около 100 человек.

4. При нефтяном отоплении значительно облегчается труд кочегаров, так как регулировка горения от минимума до максимума производится просто и легко. Работа кочегаров сводится только к наблюдению за горением. При угольном же отоплении от кочегаров

[1] Содержание серы в нефти, как правило, не превышает десятых и даже сотых долей процента.

требуется крайнее напряжение их сил, и часто невозможно бывает поддерживать продолжительное время форсированный ход судна, главным образом, из-за утомления кочегаров.

143. Из истории нефтяного отопления

Многочисленные ссылки, указывающие на употребление нефти в качестве топлива, имеются еще у древних греческих и римских писателей [1].

Следовательно, нефть очень давно была известна многим народам. Однако, на протяжении тысячелетий использование нефти было и примитивным и ограниченным, не выходящим за пределы отдельных местностей. Попытки применить нефть как топливо в более широком промышленном масштабе мы встречаем только с XIX в. в Европе и в США.

Например, Кохран в 1825 г. пробовал заменить твердое топливо жидким, употребляя для сжигания последнего лампы, неподвижно прикрепленные к поду печи [2].

Через 29 лет после почина Кохрана (1854 г.) Капуйе (Capouillet) предлагает сжигать нефть в открытой чаше, поставленной на поду печи [3].

В 1856 г. Андерсон [4] заставляет падать жидкое топливо мелкими струйками на ряд наклонных плоскостей, с которых оно сбегает каскадом.

В 1863 г. Адамс [5] предлагает вводить нефть в топку под сильным давлением сжатого воздуха, приближаясь таким образом к мысли о механической пульверизации.

Одновременно с ним Малэ [6] (Франция) еще ближе подходит к этой мысли, рекомендуя распылять пары горючих жидкостей для паяльника. Шприц [7] накачивал нефть на кирпич, пемзу или асбест по нескольким трубкам, чтобы она могла больше раздробляться.

Карбонель [8] в 1873 г., возвращаясь к мысли Андерсона, пробует направлять нефть через продырявленную металлическую пластинку на наклонные плоскости.

В 1874 г. Гиринг (Gearing) [9] предлагал пускать нефть дождем не на наклонные плоскости, а на огнеупорный материал.

---

[1] Еще в 450 г. до н. э. Геродот писал о выходах нефти на земную поверхность в различных местностях (Геродот, книга 6, глава 119). Сообщает о нефти и о ее применении для освещения Плиний (Historia naturalis, кн. 2, глава 108), а также и другие античные авторы. С 930 г. н. э. засвидетельствовано использование нефти в Баку, но только в 1712 г. Кемпфер достаточно точно писал о бакинских нефтяных месторождениях. В первой половине XVII в. становятся известными в Европе американские нефтяные месторождения. Во второй половине XVII в. делаются даже попытки самой примитивной и ограниченной эксплоатации европейских месторождений (Ганновер). Заслуживает внимания, что уже в 1678 г. патер Афанасий Кирхер в своей книге «Подземный мир» (Mundus subterranneus) предлагал выходящую из земли нефть направлять по свинцовым трубам к месту использования, т. е. дал идею нефтепровода. Но все это были лишь первые сведения и зарождающиеся идеи, реализация которых в широком масштабе началась только во второй половине XIX в. *(Прим. ред.)*

[2] Repertory of art., т. 3, стр. 1121; англ. пат. № 5283, 1825 г.

[3] Англ. пат. 1851 г. № 775. Abridg., v. 30, p. 396.

[4] Англ. пат. 1856 г. № 2058. Abridg., v. 30, p. 591.

[5] Англ. пат. 1863 г. № 3195. Abridg., v. 30, p. 1105.

[6] Brevets d'invention, № 62498, 1864.

[7] Англ. пат. 1865 г. № 1928. Abridg., v. 30, p. 1265

[8] Америк. пат. 1873 г. № 140009.

[9] Америк. пат. 1874 г. № 157596.

В 1888 г. Фриндле [1] рекомендует сжигать нефть с помощью асбестовых фитилей, как керосин в обыкновенных лампах.

В 1879 г. в Америке на водах Мононгагелы появляется первый пароход, отапливаемый нефтью [2], однако он работал недолго и не оставил после себя никакого следа.

Главной причиной, задерживающей развитие нефтяного отопления в Америке, являлось распространение лесов и дешевизна дровяного отопления. Интерес к нефти в то время был развит лишь как к осветительному материалу.

Производство опытов нефтяного отопления в Европе началось одновременно с Америкой, но распространение там жидкого топлива шло еще медленнее, чем в Америке, так как нефть в Европе ценилась гораздо дороже, а каменный уголь становился повсеместно дешевле.

В то время как в Америке и в ряде государств Европы работали над опытным применением нефти, в России на Кавказе, где были расположены богатейшие месторождения нефти, еще и не думали об этом. Только в 1858 г. в Сураханах (Бакинский район) был построен керосиновый завод Кокорева [3] для получения керосина из «кира» [4].

Завод построили в 12 *км* от города и берега моря с той только целью, чтобы воспользоваться даровым отоплением — вечными газами, выходящими в Сураханах из трещин земли.

В 1861 г. для отопления парафинового завода, построенного Витте и К⁰ на Святом острове против Апшеронского полуострова, решили употребить вместо дорогого привозного кира горючую массу, составленную из навоза и остатков от перегонки нефти в керосин (мазут).

Сжигание этого искусственного тестообразного топлива, называемого также киром, производилось на поду топок. Для поддержания горения в топке топливо периодически помешивалось. Оставшуюся золу выгребали из топок.

С увеличением числа заводов росла и потребность в топливе. Искусственного кира уже было недостаточно для удовлетворения нужд бакинской промышленности.

Позднее некоторые заводчики рискнули сжигать нефтяные остатки без примеси навоза. Наливая их небольшими ковшами непосредственно на под топки, они заметили, что горение идет весьма равномерно, а перегонка нефти значительно улучшается. Сведения об успехах нефтяного отопления в Америке дошли до России значительно позже.

В 1864 г. ученый комитет Морского министерства поручает русским агентам в Америке следить за способами сжигания нефти, достать чертежи котлов, печей и описание колосников и сосудов, употребляемых в печах для нефти.

Академии Наук были сообщены все эти сведения для исследования свойств нефти, ее количества и установления возможности использования своих месторождений нефти.

---

[1] Англ. пат. 1888 г. № 4723.

[2] Scientific American. V. 41, p. 42, 1879.

[3] По приглашению Кокорева его завод осматривал в 1863 г. Д. И. Менделеев, только по указаниям которого удалось успешно наладить производство. *(Прим. ред.)*

[4] По Гулишимбарову «кир» — асфальт новейшего образования. Д. И. Менделеев называет «киром» землю, пропитанную нефтью.

По мере постройки новых керосиновых заводов, нефтяные остатки стали сжигать под кубами при перегонке нефти. Остатков получалось очень много, от 50 до 60% общего количества перегнанной нефти. Заводчики не знали, что с ними делать и охотно отдавали их даром и даже спускали в земляные ямы, где бесцельно сжигали.

Одновременно вырастающая бакинская промышленность требовала колоссального количества топлива. Привозное топливо, дрова и уголь, было дорого, и потому все более усиливаются изыскания новых способов сжигания нефти (нефтяные топки). В 1869 г. Бакинская пароходная контора «Кавказ и Меркурий» командировала своего механика О. К. Ленца за границу для изучения нефтяного отопления вообще и отопления пароходов нефтью в частности (Франция).

Возвратившись из поездки, Ленц изготовил целый ряд приборов для сжигания нефти в топках судовых котлов и в начале 70-х гг., оставив службу, занялся самостоятельной промышленной деятельностью по использованию нефти. Опыты Ленца были настолько удачны, что нефть стала обычным топливом на судах каспийского флота.

Во второй половине 70-х гг. вошел в нефтяное дело Нобель, который энергично взялся за разрешение вопроса о применении нефти в различного рода печах. В 1878 г. О. К. Ленц приспособил свою форсунку для паровозов на Закавказской ж. д.

Шпаковский, Ленц и Нобель сыграли большую роль в деле развития нефтяного отопления в России [1].

С тех пор, как было установлено, что мазут представляет собой хорошее топливо, спрос на него с каждым годом стал возрастать. Одно время стоимость сырой нефти была ниже стоимости мазута, и заводчики, поставляющие мазут, старались разбавлять последний сырой нефтью.

Как контр-мера, были выработаны требования, каким должен отвечать мазут, а именно удельный вес 0,89—0,92 и температура вспышки не ниже 110°.

Сырая нефть имела значительно меньшую температуру воспламенения (табл. 72) и поэтому при использовании ее, как топлива, представляла большую опасность в пожарном отношении.

Таблица 72

Район добычи нефти	Удельный вес	$t°$ воспл.
Балахна	0,875	25°Ц
Кубань	0,814	ниже 11,5°Ц
„	0,895	„ 11,5°Ц
Грозный	0,873	„ 11,5°Ц

В дальнейшем мы будем называть непереработанную нефть сырой нефтью, а остатки, получающиеся от перегонки нефти, — нефтью или мазутом.

[1] Следует отметить роль Д. И. Менделеева в деле развития нефтяной промышленности и нефтяного отопления в России. Еще в 1863 г. Д. И. Менделеев изучил на месте бакинские промыслы и дал ряд ценнейших предложений, иногда далеко выходивших за пределы возможностей того времени (нефтепровод Баку—Батум и т. д.). Менделееву же принадлежат и первые определения теплотворной способности нефти по им же разработанным формулам (Д. И. Менделеев. Основы фабрично-заводской промышленности, вып. I, стр. 90). *(Прим. ред.).*

144. Топка Бидля [1] (Bidl)

В 1862 г. одна из первых в Нью-Йорке была изобретена и построена топка Бидля, предложенная для нефтяного отопления судового котла. Основной частью топки был аппарат Бидля. Он состоял из железного ящика *A*, воронкообразной решетки *c*, нефтеподводящей трубки *a* и шести фурм *bb*, через которые вентилятором вдувался в топку воздух (рис. 225а).

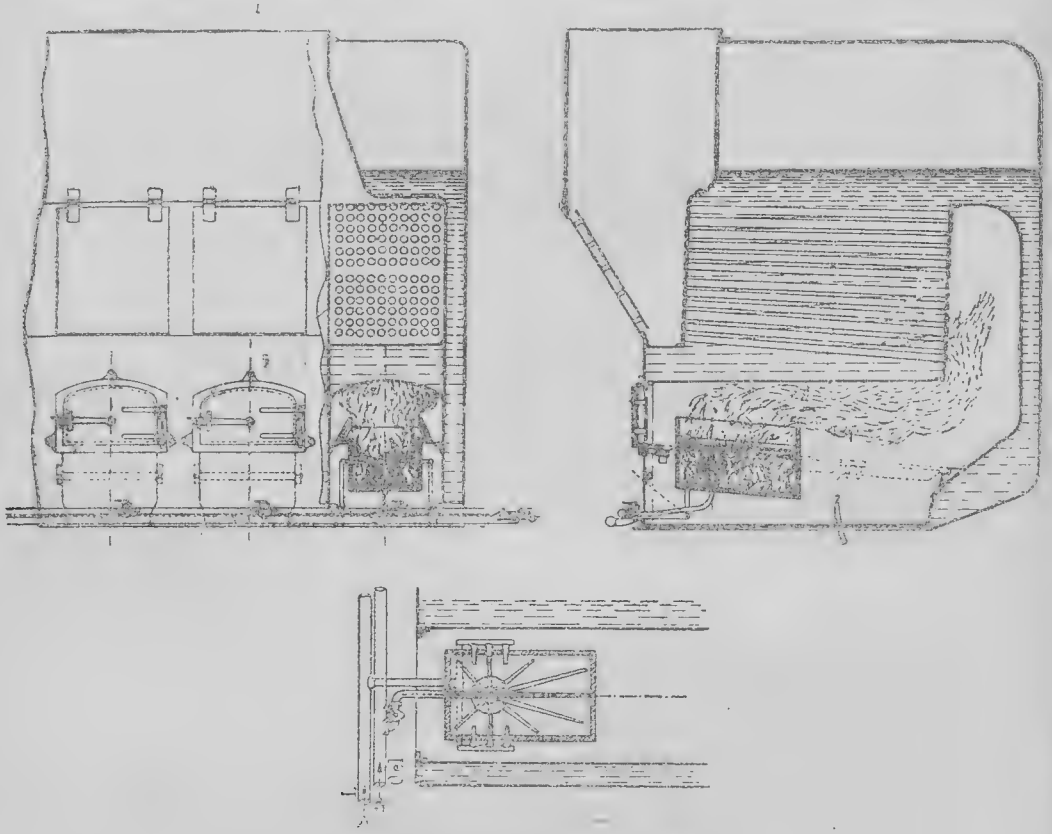


Рис. 225. Нефтяная топка Бидля.

Ящик *A* в топке судового котла устанавливался на колосниковую решетку (рис. 225). Дно ящика было наклонено к задней стенке котла. Решетка *c* устанавливалась примерно на средине ящика. Во время работы котла она наполнялась горящим углем. Нефть для сжигания подводилась через дно чугунного ящика по трубке *a* и сливалась на поверхность раскаленного угля. Там она нагревалась и воспламенялась. Недогоревшая на поверхности угля нефть стекала на дно ящика, где она расплывалась по лучеобразным канавкам и сгорала.

[1] Engler C. Das Erdöl von Baku. Стр. 32, Stuttgart, 1886. Ledieu A. Les nouvelles machines marines. T. III, стр. 166, 1882. Specification. № 1989 and 3165, 1862. Abridgments of specification. V. 30, p. 979 Schulz B. Die technische Entwicklung der Oelfeuerung. Beitrage z. Geschichte der Technik und Industrie, T. XVI, стр. 106 1926.

Эксплоатационные наблюдения показали, что горение в этой топке происходило весьма несовершенно. Топка давала густой черный дым, вследствие этого она не получила успеха.

145. Топка Шоу и Линтона

22 ноября 1862 г. Шоу и Линтон[1] взяли патент на нефтяную топку для локомотивного котла, несколько похожую по конструкции на топку Бидля, в дальнейшем несколько усовершенствованную (рис. 226). В этой топке нефть из расходного бака поступала самотеком в установленный в топке чугунный ящик *A* и растекалась по наклонному дну. При нагревании нефть выделяла часть более легких летучих веществ. Последние выходили через отверстия *B* в топку и сгорали. Несгоревшая нефть по воронке *b* стекала в сосуд *C*. В нем более тяжелые части нефти повышали свою температуру и сго-

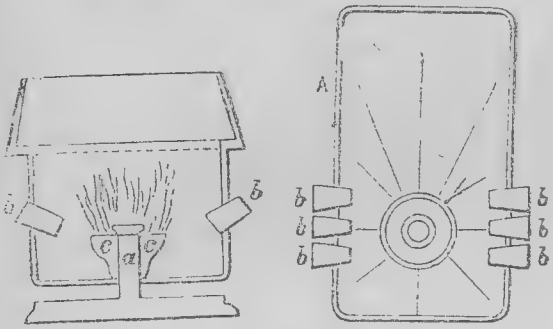


Рис. 225а. Аппарат Бидля.

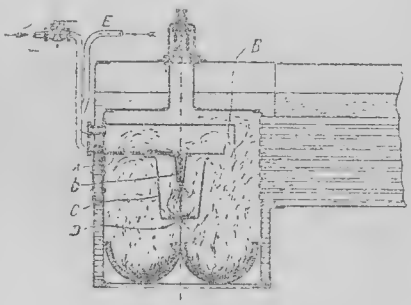


Рис. 226. Топка Шоу и Линтона.

рали, а остаток спускался через отверстие *D* в желобообразные чугунные сосуды, выложенные шамотом, где и догорал. Воздух для горения нефти вдувался по трубе *E* в сосуд *A*.

Невыгодной особенностью топки являлось расположение в ней массивных чугунных ящиков, которые находились под действием высоких температур.

Из-за неблагоприятных температурных условий и неравномерного подвода воздуха горение в топке проходило неспокойно, наблюдались даже случаи взрыва летучих веществ, накопляющихся в топке в большом количестве. При воспламенении летучих в топке образовывалось большое количество газов, не имеющих свободного выхода. Находясь в ограниченном объеме топки, газы внезапно поднимали свое давление и вырывались из топки в атмосферу через газоходы. Создавшимся в топке давлением иногда разрушались ее слабые места, через которые выбрасывались огромные языки пламени. Последние часто производили ожоги кочегаров и пожар в котельных.

Несколько позже для борьбы со взрывами изобретатели предложили устраивать в потолке топки предохранительный клапан. Это не спасало от возможных взрывов, но гарантировало целость топки.

Топки Шоу и Линтона не получили широкого распространения, так как они были дороги и сложны, а срок службы их был непродолжителен.

---

[1] Морской сборник, № 7, стр. 49—55, 1864; VDI, стр. 1017, 1887.

146. Топка Эдоуна (Aydoun)

Освоением нефтесжигания в США больше всего интересовалось военное министерство. В 1886 г. морской министр отпустил 5 тыс. долларов на проведение опытов по сжиганию нефти на канонерской лодке «Palore».

Наряду с опытами по освоению нефтесжигания в США такая же работа велась и во Франции. В результате в 1865 г. Эдоун взял патент на струйчатую топку (рис. 227). Такая же топка была предложена еще в 1853 г. в Англии Иджином[1]. Нефть для сжигания в топке Эдоуна сливалась через особые трубки на наклонно устано-

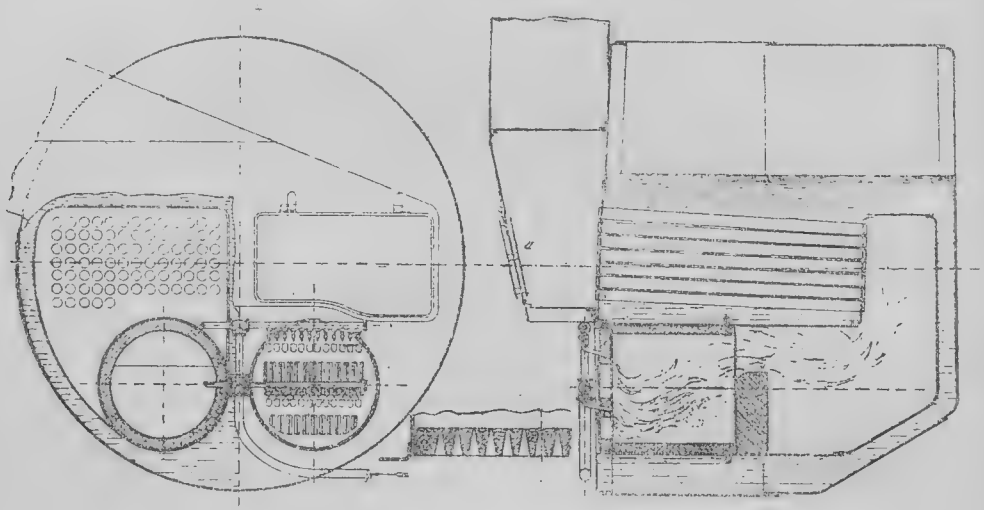


Рис. 227. Топка Эдоуна 1865 г.

вленные желобчатые колосники. Стекая по ним вниз, она нагревалась и сгорала. Воздух подавался в топку через щели между колосниками.

По опытным данным Эдоуна, в этой топке удавалось получать 2,0 *и. л. с.* на 1 *кг* сжигаемой нефти или, что все равно, 1 *кг* нефти мог испарять 13—15 *кг* пара. Опыты проводились при естественной тяге в 10 *мм* вод. ст.

Горение в топке было весьма несовершенно. Из трубы почти постоянно выходил черный густой дым. Это не позволило топке получить широкого применения в особенности на военных судах.

147. Топка Клер-Девиля

В 1868 г. Клер-Девиль[2] изобрел топку, которая была установлена на императорской яхте Наполеона «Puebla» (рис. 228). Наполеон предложил изобретателю заняться опытами нефтяного отопления яхты за личный счет императора. Топка Девиля была также установлена и на броненосном крейсере «Dupuy de Lôme». Она отличалась от топки

[1] Annales de chimie et de la physique; T. XV, стр. 30, 1868. VDI, стр. 1017; 1887; Engl. specification, № 2132, 1853; Dinglers Polyt. Journal, T. 191, стр. 28, 1869.

[2] Ledieu A. Les nouvelles machines marines, T. III, стр. 166, 1882; Deville S. C. Combustion du pétrole dans les foyers des machines mobiles. Comptes Rendus, T. 68, стр. 325.

Эдоуна лишь вертикальным расположением колосников и более тонкими просветами для прохода воздуха между колосниками.

При пробном рейсе в 1868 г. котел, оборудованный этой топкой, развивал мощность 65 *и. л. с.*, а расход мазута на 1 *и. л. с. ч* составлял 1,47 *кг*. Раньше на угольном отоплении этот котел развивал мощность только в 63 *и. л. с.*, а расход угля на 1 *и. л. с. ч* составлял 2,25 *кг*.

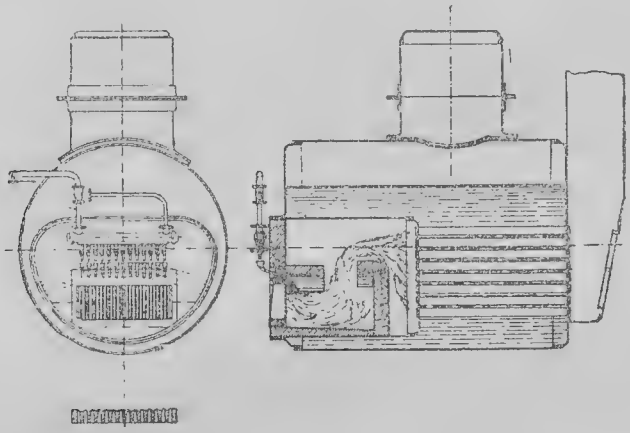


Рис. 228. Топка Клер-Девиля.

В топке Девиля, установленной на паровозном локомотивном котле, при испытаниях 1 *кг* нефти испарял 10,9 *кг* пара против 7,9 *кг* пара, испаряемого лучшим французским углем. Нагревание нефти в данной топке осуществлялось за счет тепла, излучаемого обмуровкой жаровой трубы. Топка Девиля имела те же недостатки, что и топка Эдоуна, и также не получила широкого распространения.

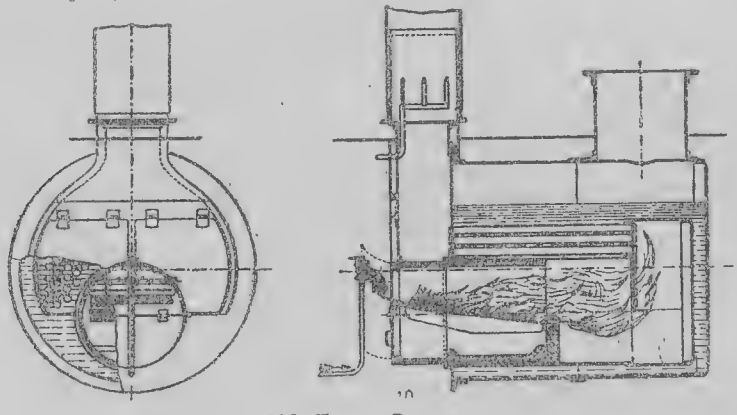


Рис. 229. Топка Вагенкнехта.

148. Топка Вагенкнехта (Wagenknecht)

В 1871 г. в Германии появилась топка Вагенкнехта[1] (рис. 229), которая по аналогии с угольными топками была оборудована колосниковой решеткой, лежащей почти горизонтально. Каждый колосник имел на поверхности длинную канавку, в которую по специальным трубкам стекала нефть.

[1] Морской сборник. Т. 8, стр. 5, 1876.

Выгодной особенностью этой топки была меньшая скорость движения нефти по канавкам. Горение происходило более совершенно, так как нефть дольше задерживалась на колосниках.

Существенным недостатком всех колосниковых нефтяных топок являлось проливание нефти в зольник во время качки корабля, что увеличивало потери от механического недожога топлива.

В России в 1876 г. была запатентована топка Каменского [1], весьма сходная с топкой Ватенкнехта [2].

По опытам Каменского, испарительность ($И_в$) нефти при неблагоприятных условиях составляла 8 *кг* пара на 1 *кг* нефти, а при наилучших условиях $И_в = 11—12$ *кг* на 1 *кг* нефти.

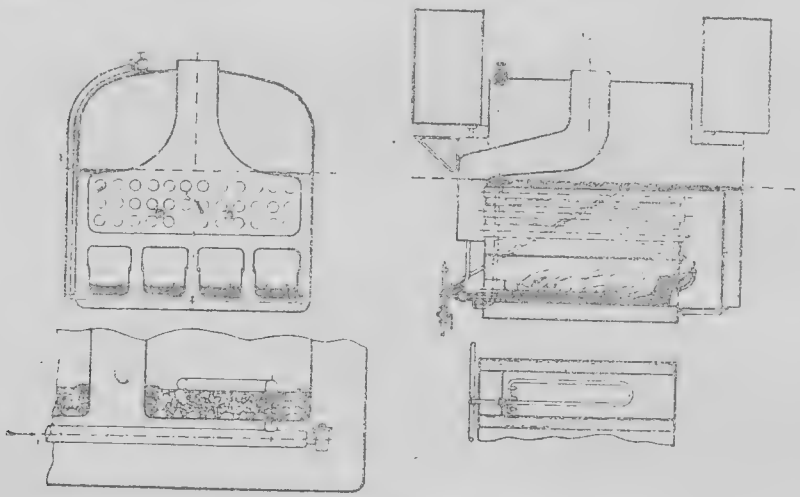


Рис. 230. Топка Ричардсона.

149. Топка Ричардсона

В конце 1864 г. Ричардсон [3] предложил английскому адмиралтейству испытать его топку (рис. 230), предназначенную для сжигания жидкого топлива с помощью пористых веществ. Принцип устройства топки был взят у Милля.

Основной частью топки Ричардсона были пористые огнеупорные плиты, которые имели сверху плоскую поверхность, а снизу ряд продольных каналов. Нефть поступала в эти каналы самотеком, из них она просачивалась вверх по пористой плите, как по фитилю, по пути подогревалась и на поверхности плиты сгорала. Для усиления тяги и повышения интенсивности горения Ричардсон применил паровое дутье. Пар для этой цели от своего же котла направлялся по расположенной на поверхности плиты U-образной трубке, через три сопла в нефтяные каналы.

Благодаря такому устройству, дутьевой пар перегревался, что давало большую эффективность дутья. При эксплоатационной проверке топки выяснилось, что плиты часто закоксовывались, в связи с чем их приходилось заменять новыми. Топка Ричардсона поэтому не получила успеха в судовых установках.

[1] VDI. Стр. 1015, 1887.

[2] Записки Киевского отд. имп. русск. технич. об-ва, Т. III, стр. 259—260.

[3] Specific. № 1131, 1864; Морской сборник, 1865, № 4, стр. 33; Colburn's Magazine, № 3, 1865; Морской сборник, № 2, стр. 38, 1865.

150. Газовые топки. Топка Фута [1]

Первые неудачи со сжиганием нефтяных остатков на колосниках, плитах и сосудах побудили некоторых изобретателей искать способ сжигания нефти, основанный на совершенно иных началах. В частности многие трудились над разработкой практического, простого и удобного способа превращения мазута в газ, сжигать который к тому времени научились сравнительно хорошо.

Над изобретением аппарата, превращающего жидкое топливо в газ, более трех лет работал полковник Генри Фут. Ему удалось лишь в 1866 г. построить свою топку со специальным аппаратом (рис. 231, 231а) для одного из пароходов. Аппарат Фута предназначался для испарения в газ керосина, но не нефти. Керосин для сжигания в топке Фута поступал в молоткообразный чугунный сосуд *A* по трубке *B*, воздух под давлением 0,35 *атм* — по трубке *H* и перегретый пар — по трубке *F*, наполненной железными стружками.

Работа аппарата Фута протекала таким образом. Под сосудом *A* дровами разводился небольшой огонь. Когда дно сосуда *A* нагревалось настолько, что керосин, введенный в него, мог испаряться, открывали кран трубки *B* и впускали керосин в сосуд *A*. Образовавшиеся в сосуде *A* пары керосина выходили в топку через горелки *DD*. Часть керосиновых паров сгорала в топке, а часть отводилась по трубке *K* под сосуд *A*, где и сгорала. Тепло, выделявшееся при горении последней порции газа, шло на нагревание сосуда *A*, а стало быть, на испарение керосина.

Паровая трубка *F*, наполненная железными стружками, во время работы котла находилась в раскаленном состоянии. Водяной пар, проходя по этой трубке, сильно перегревался и частично разлагался на кислород и водород. Все это поступало в сосуд *A*, где перемешивалось с воздухом и парами керосина. Полученная горючая смесь выходила к горелкам, где и сгорала.

На рис. 231а показан аппарат Фута, установленный в топке судового котла канонерской лодки «Палос», где он работал с 14 июня по 2 июля 1867 г.

При эксплоатационной проверке в аппарате Фута выявилось много недостатков. Главный из них: образование нагара в сосуде. Нагар уменьшал теплопередачу к керосину, а стало быть, и затруднял превращение керосина в газ. Для поддержания более нормального горения в топке сосуд приходилось часто чистить.

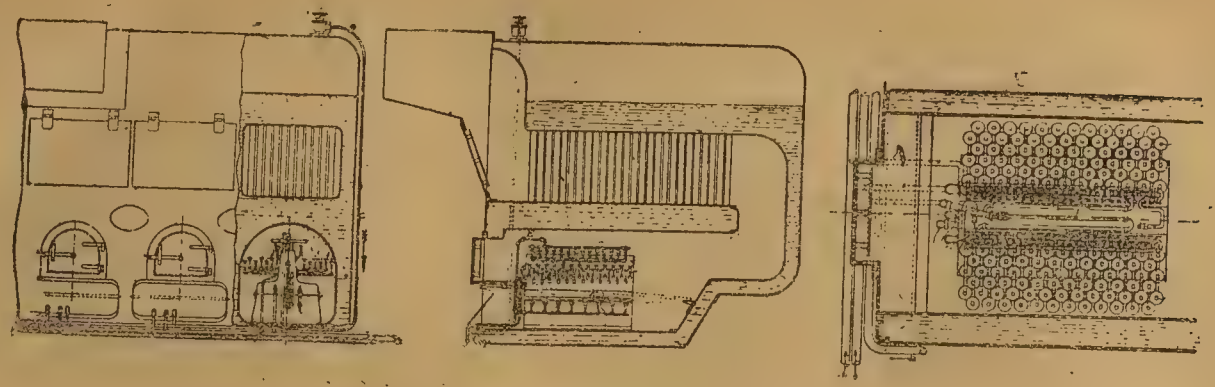
В основном по этой же причине закончились неудачей попытки применения для отопления котлов газовых аппаратов Гака, К. Сименса, Сарони и др. От разработки газовых аппаратов начали отказываться. Удовлетворительное разрешение вопроса нефтесжигания многие изобретатели пытались найти в разработке пульверизаторов.

Намек на устройство пульверизаторов был дан еще в аппарате Иджина в 1853 г., Бидля в 1862 г., Адамса в 1863 г. и т. д.

Все эти попытки не дали сдвигов в области сжигания нефти под паровыми котлами.

---

[1] Амер. пат. № 58087, 1866 г.; Ueber die Anwendung des Petroleums zur Dampfkessel-Feuerung. von d-r Zängerle. Dingler, Polyt. Journ. T. 187, стр. 211—213, 1868; Kunst und Gewerbeblatt, стр. 721, 1867; Морской сборник, № 7, стр. 42, 1867. Dingler, Polyt. Journ. T. 191, стр. 31, 1869.



ис. 231. Топка Фута.

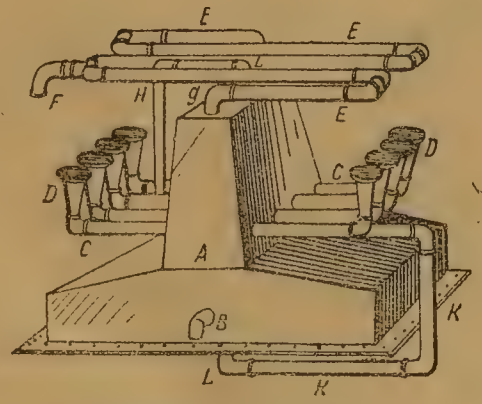


Рис. 231а. Аппарат Фута.

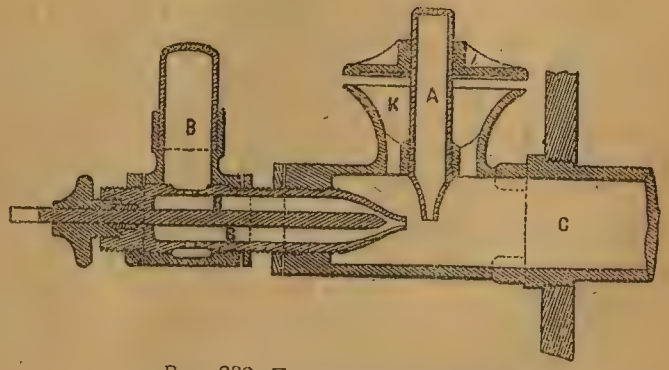


Рис. 232. Пульверизатор Эйдона.

ФОРСУНКИ-ПУЛЬВЕРИЗАТОРЫ

151. Первый пульверизатор Шпаковского

Лишь в 1865 г. Шпаковский[1] разработал пульверизатор, давший при применении на пароходе в 1866 г. обнадеживающие результаты. В пульверизаторе Шпаковского воздух вдувался в топку над отверстием трубки, погруженной в скипидар. Вследствие этого в скипидарной трубке создавалось разрежение, под действием которого скипидар подымался вверх, подхватывался сжатым воздухом и разбрызгивался на мельчайшие капли в топке, где и сгорал.

По словам Шпаковского, сжигание нефти и скипидара посредством открытого им способа было настолько совершенно, что при этом не было ни дыма ни запаха. Этот пульверизатор Шпаковского не получил широкого применения из-за дороговизны скипидара.

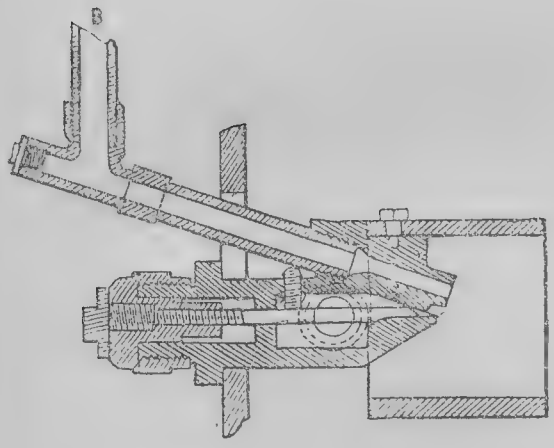


Рис. 233. Вторая конструкция пульверизатора Эйдона.

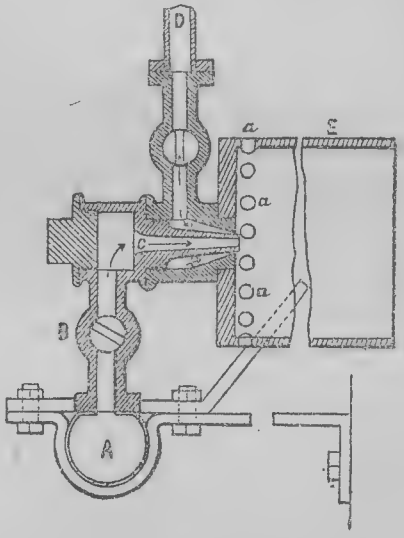


Рис. 234. Пульверизатор Шпаковского.

152. Пульверизатор Эйдона

В 1865 г. английский инженер Эйдон[2] взял патент в Лондоне на изобретенный им пульверизатор для сжигания нефтяного топлива. Первоначально пульверизатор Эйдона (рис. 232) состоял из широкой трубки *B*, вдоль которой проходил стержень. Последний имел винтовую нарезку, благодаря которой он мог передвигаться по трубке. При ввинчивании стержня отверстие трубки закрывалось. Трубка *B* служила для перегретого пара. Перпендикулярно к острию трубки сверху привинчивалась другая трубка *A*, по которой поступала нефть. Последняя, падая из трубки, подхватывалась струей пара и раздроблялась ею на мельчайшие капли. Затем паронефтяная смесь смешивалась с воздухом, поступающим в насадок *C* через каналы *K*.

[1] Англ. пат. № 1711, 1865 г.; Амер. пат. № 53763, 1866 г.; Морской сборник, № 4, стр. 174, 1866; Морской сборник, № 9, стр. 57, 1866.

[2] Engl. Specif. № 2661, 1865; Dingler's Polyt. Journ. T. 184, стр. 111, 1867; Морской сборник, № 10, стр. 131, 1868; Proceedings of the institution of civil engineers, Стр. 177, 1877—1878.

Форсунка Эйдона была первым опытом парового пульверизатора для нефти.

Одним из крупных недостатков пульверизатора Эйдона нужно считать употребление перегретого пара, так как перегревание тогда было сопряжено с большими неудобствами. Кроме того, при описанном расположении трубок никогда не могло происходить полной пульверизации нефти. Струя получалась метлообразной, и теплота в топке распределялась неравномерно.

Через год Эйдон сделал в пульверизаторе изменения (рис. 233). Он расположил нефтяную трубку наклонно под углом примерно в 40° к паровой и вгонял по ней нефть в топку под сильным давлением. В 1869 г. Эйдон еще раз изменил конструкцию своего пульверизатора. Он уже состоял из двух конических трубок, входящих одна в другую. Внутренняя трубка не доходила до конца наружной, и между ними оставался промежуток, через который в прибор притекал пар из котла, а по внутренней трубке притекала нефть. (Аналогичный пульверизатор был изобретен еще в 1867 г. Стивенсом) [1]. Но и измененный таким образом пульверизатор имел много недостатков.

Пар для пульверизации в форсунках Эйдона получался от своего котла. При разводке пара его форсунка не могла быть пущена в действие. Приходилось поднимать пары с помощью каменного угля, для чего в топке даже была предусмотрена колосниковая решетка. Слабое горение на решетке продолжалось и после включения в работу нефтяной форсунки, так как нефть распылялась далеко не совершенно: часть ее падала на решетку и догорала.

Пар, выходя из кольцевого пространства и встречая суживающуюся наружную трубку, отражался от нее и задерживал вытекание нефти из внутренней трубки, если струя шла под слабым давлением. Это приводило к несовершенному распыливанию и необходимости поддерживать горение на решетке. Пульверизатор был употреблен в Англии на заводе Барнесаа

153. Второй пульверизатор Шпаковского

Для распыливания нефти Шпаковский [2] в новом пульверизаторе начал применять влажный пар. Опыты увенчались полным успехом, и он взял патент в России, где и применил впервые в 1870 г. свой пульверизатор. Последний (рис. 234) состоял из двух трубок, входящих одна в другую таким образом, что внутренняя трубка выдавалась из наружной примерно на 1 *мм* и между ними оставался небольшой кольцевой зазор.

Во внутреннюю трубку *C* нефть притекала из горизонтальной трубки *A* и регулировалась краном *B*. Пар же направлялся по трубке *D* и, выходя из кольцеобразного зазора, обхватывал со всех сторон струю нефти и пульверизировал ее. К концу форсунки был прикреплен раструб *E*, направляющий струю пламени в одну сторону. Ввод воздуха в топку производился через отверстия *a* в раструбе. Для предварительной разводки топки котла и доведения в нем давления пара до 0,5 *ат* употреблялись дрова. С этой целью в топке были оставлены колосниковая решетка и внизу особое поддувало, которое закрывалось, когда начинал действовать пульверизатор. Замечательной особенностью этого пульверизатора являлся ввод воздуха только

[1] Stevens. B. T. Англ. пат. № 2196, 1867.
[2] Гулишимбаров. Нефтяное отопление. Стр. 76—79, СПБ. 1894.

к корню факела, тогда как во всех предыдущих и во многих последующих форсунках воздух подводился по длине факела.

Шпаковский первый пришел к мысли, что процесс горения нефти требует подвода почти всего количества воздуха к корню факела.

Как показали дальнейшие теоретические работы опытные наблюдения, процесс горения мазута распадался на следующие моменты: 1) испарение, 2) окисление, 3) воспламенение, 4) крекинг-процесс, т. е. распад капелек мазута на жидкие и газообразные углеводороды.

Вспышка мазута происходит при температуре 100—105° Ц. При температуре 200—300° Ц наряду с испарением мазута происходит и его окисление, которое протекает при этих температурах очень быстро и устойчиво. Нагревание мазутных капель до температуры 350—400° Ц приводит к распаду мазута на газы, пары и твердые соединения.

Для получения наиболее совершенного горения необходимо всячески способствовать окислительным реакциям и, наоборот, препятствовать крекингу. Помимо хорошего распыливания, это достигается подводом почти всего количества воздуха к корню факела. Совершенно неправильно растягивать ввод воздуха по всей длине факела, так как при этом образуется большое количество сажи, которую часто не удается потом сжечь.

Несмотря на ввод воздуха к корню факела, горение в топке протекало не всегда удовлетворительно. В факеле ясно можно было видеть большие капли нефти, а, как давно уже замечено, всякое топливо, в том числе и капли мазута, горит с поверхности. В связи с этим, горение крупной капли будет продолжаться дольше, чем горение мелкой. Очень часто капли мазута не успевали сгорать налету и падали на пол, образовывая нагар такой твердости, что его было трудно отбить даже зубилом. Поэтому еще и в то время основное внимание обращали на достижение наиболее тонкого распыливания мазута.

Описанная форсунка Шпаковского была применена в 1870 г. на пароходе Каспийского моря «Иран», на котором была установлена паровая машина старой системы «Пена». По эксплоатационным наблюдениям расход нефти на 1 *и. л. с.* в час составлял 4 *кг.*

В 1871 г. форсунками Шпаковского был снабжен пароход Каспийского моря «Россия», а в 1873 г. ими были оборудованы топки котлов парохода «Гельма». На этом пароходе удалось снизить расход мазута до 3 *кг/и. л. с. ч.*

В 1879 г. форсунки Шпаковского были установлены на пароходах «Дагестан» и «Пир Базар». Последние были снабжены 80-сильными машинами Вульфа. Давление пара в котлах поддерживалось равным 4 *ати.* Расход мазута на этих пароходах был снижен до 2 *кг/и. л. с. ч.*

На всех вышеупомянутых пароходах для защиты задней стенки топки от действия факела ставилась шамотная кирпичная стенка.

154. Форсунки Ленца

Опыты по нефтяному отоплению проводили и в стационарных установках. Так, например, с 1868 г. по 1869 г. нефтяное отопление испытывалось на механических заводах Бакинского порта и общества «Кавказ и Меркурий». Опыты закончились неудачей. Тогда правление общества командировало своего механика О. К. Ленца за границу для ознакомления с существующими там нефтяными топками и их форсунками. Ленц тщательно изучил за границей аппараты

Эйдона и Дорсета в Англии и С. К. Девиля во Франции. Возвратившись из командировки, Ленц [1] спроектировал топку Девиля, которая в 1870 г. была испытана на пароходе «Державин». Опыты не дали удовлетворительных результатов. Тогда Ленц присоединил к топке Девиля форсунку Эйдона. Этим мероприятием он предполагал соединить преимущества двух изобретений: топки Девиля, в которой более совершенно были выполнены колосниковые решетки, и форсунки Эйдона, которая должна была увеличить производительность котла. При опытной проверке и это мероприятие не дало положительных результатов.

В 1871 г. Ленц проводит дальнейшие опыты по нефтесжиганию на пароходе «Артельщик» Закаспийского торгового общества. Здесь он выбрасывает из своей топки решетку Девиля и по примеру Шпаковского снабжает топку колосниковой решеткой для дров.

Работая над устранением недостатков форсунки Эйдона, Ленц в 1872 г. изобретает свою форсунку, которая и была поставлена в том же году на пароходе «Волга» общества «Кавказ и Меркурий».

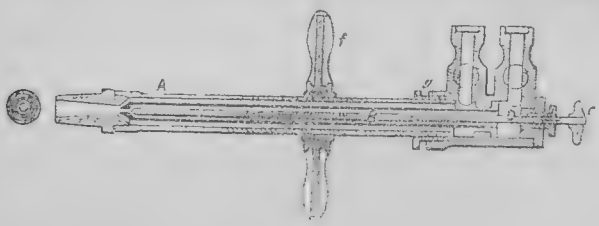


Рис. 235. Форсунка Ленца.

Устройство форсунки Ленца видно из рис. 235. Как и в форсунке Эйдона, Ленц применил стержень *D* для регулирования количества нефти, поступающей по внутренней трубке *B*. Пар для распыливания нефти вводился по кольцевому пространству трубки *A*. Отличительной особенностью форсунки Ленца являлась возможность регулировать количество поступающей в топку нефти не только кранами перед форсункой, но и посредством передвижения стержня *D* маховичком *c* в конце. Количество распыливаемого пара можно было регулировать, кроме клапана, осевым перемещением трубки *A* посредством маховика *f*. Для лучшего раздробления нефти на конец форсунки надевался сопловой наконечник. Данная форсунка в работе давала весьма длинный факел, в котором появлялись капли нефти. Последние, не успевая догорать, падали на заднюю стенку топки, где образовывали нагар. Такое несовершенное распыливание получалось вследствие того, что пару приходилось распылять довольно массивный мазутный цилиндр, выходящий из трубки *B*.

Желая устранить данный недостаток, Ленц построил другую форсунку, в которой нефть выходила из трубки *B* уже не в форме сплошного цилиндра, а в форме полого конуса. Для этой цели Ленц пропускал через трубку *B* стержень *D*, который по выходе из трубки заканчивался небольшим конусом. Сопловой наконечник в этой форсунке отсутствовал.

Форсунки Ленца последней конструкции были установлены в 1873 г. на пароходах, принадлежавших обществу «Кавказ и Меркурий» — «Туркмен», «Армянин», «Каспий».

Эксплоатационные наблюдения над работой форсунки показали, что распыливание было значительно совершеннее. Факел был широким, благодаря чему задняя стенка топки подвергалась значительно меньшим разрушительным действиям.

---

[1] Гулишимбаров. Нефтяное отопление. Стр. 92—107, СПБ. 1894.

Последнее преимущество породило и новый недостаток: колосниковая решетка быстро разрушалась от задевания колосников факелом. Это явление побудило Ленца снабдить свои форсунки в устье факела широкими раструбами (цилиндрическая форма раструбов у корня факела переходила в щелевую форму снаружи раструбов). Проверка работы форсунок с раструбами показала, что факел получался плоским и не задевал решетки.

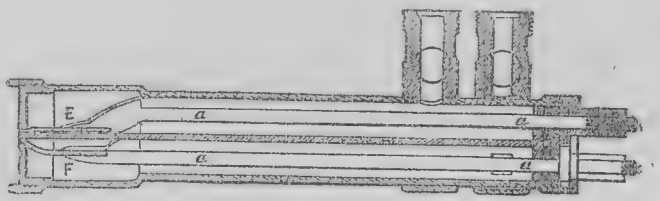


Рис. 236. Щелевая форсунка Ленца.

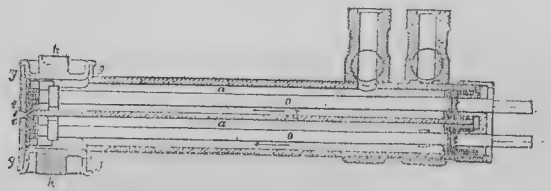


Рис. 236a. Щелевая форсунка Ленца.

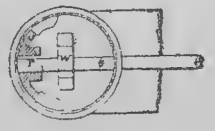


Рис. 236b. Золотники щелевой форсунки Ленца.

Впоследствии Ленцу пришла мысль получать плоскую форму пламени непосредственно в форсунке. В 1873 г. он построил щелевую форсунку (рис. 236). Цилиндрический корпус форсунки завинчивался в прямоугольную коробку. Нефть в данной форсунке поступала в верхнюю половину корпуса, а пар — в нижнюю. Для выхода нефти и пара из форсунки в лобовой стене коробки устраивались плоские щели ее (рис. 236a). Количество расходуемого мазута и пара могло регулироваться золотниками *E* и *F* (рис. 236a, 236b). Последние перемещались в осевом направлении пара при помощи эксцентриков, насаженных на стержни *aa*. Форсунки были поставлены на пароходах «Великий князь Михаил», «Князь Барятинский» и «Волга». Ниже мы приводим основные характеристики этих пароходов (табл. 73).

Таблица 73

Наименование пароходов	Мощность машин *и. л. с.*	Давление пара в котле *ати*	Часов. расход топл. нефти *кг*	Часов. расход угля антрацита *кг*	Расход нефти *кг/л. с. ч*
„Князь Барятицский“	120	1,00	540,5	491,4	4,5
„Великий князь Михаил“	100	2,00	491,4	491,4	4,914
„Волга“	70	1,26	491,4	458,65	7,0

В 1874 г. Ленц заменил прямоугольную форму коробки в форсунке круглой (рис. 236a, 236b), что дало возможность получить доступ к золотникам *mm* отвертыванием крышек *hh*. Патент на эту форсунку Ленц взял лишь в 1876 г.

Новая форсунка отличалась от предыдущей также и движением золотников сверху вниз по направляющим брускам, для чего на стержнях *оо* устанавливались эксцентрики.

Эти форсунки были поставлены на пароходе «Озеро» и на многих локомобилях в Балахнах. Испытания этих форсунок показали, что расход мазута удельного веса 0,91 на 1 *и. л. с. ч* составляли 4 *кг*, а при тщательном регулировании процесса горения расход мазута удавалось понижать до 2,4 *кг/и. л. с. ч.*

Форсунка Ленца этой конструкции получила распространение не только в коммерческом, но и в военном флоте. Так, например, в 1875 г. форсунки Ленца были установлены на военном судне «Наср-Эддин Шах» мощностью в 160 *и. л. с.*

Эксплоатационные наблюдения над работой данных форсунок показали, что при отоплении нефтью расход ее составлял 4,3 *кг/и. л. с. ч* против 5,72 *кг/и. л. с. ч* при работе котлов на донецком антраците. Давление пара в котле поддерживалось равным 0,84—1,05 *ати.*

В 1874 г. расход мазута на военном пароходе «Хивинец» при давлении пара в 1,75 *ати* был велик, а именно $\frac{B}{N_i} = 6{,}71$ *кг/и. л. с. ч.*

Лучшие результаты удалось получить на канонерской лодке «Секира», на которой $\frac{B}{N_i}$ было снижено до 2,15 *кг/и. л. с. ч.*

Сводные данные приведены в табл. 74.

Таблица 74

Военные пароходы	Год установки нефтяного отопления	Мощность машин *и. л. с.*	Давление пара *ати*	Расход топлива в *кг* на 1 *и. л. с. ч* при отоплении	
				мазутом	антрацитом
„Хивинец"	1874	60	1,75	6,7	—
„Наср-Эддин-Шах"	1875	160	0,8—1	4,3	5,72
„Секира"	1876	70	3,15	2,15	—
„Урал"	1878	100	1,05	4,59	4,91
„Персиянин" . . .	1878	60	1,75	6,71	—
„Лоцман"	1877	22	1,75	7,55	—

Данные таблицы указывают на весьма большое колебание в расходе мазута при одинаковых конструкциях форсунок и топочных устройств, что объясняется, главным образом, различным освоением техники регулирования процесса горения мазута со стороны эксплоатационного персонала.

155. Форсунки Бенкстона

Из других типов щелевых пульверизаторов заслуживает внимания форсунка Бенкстона, которая получила применение в эксплоатации примерно с 70-х гг. Форсунка Бенкстона по своему устройству несколько напоминала распылитель Шпаковского. Отличалась она от последнего тем, что нефть здесь протекала по кольцевому пространству корпуса, а по внутренней трубке пропускался пар.

Концы обеих труб Бенкстон сплющивал, вследствие чего факел получался плоским. У Шпаковского факел был цилиндрическим, так как выходные отверстия для нефти и пара были также цилиндрическими. Расход мазута на 1 *и. л. с. ч* в форсунке Бенкстона составлял в среднем 6,5 *кг*. Горение было несовершенно, иногда наблюдалось выплевывание мазута. Последнее можно объяснить слабым напором его.

Работая над усовершенствованием своей форсунки, Бенкстон в 1874 г. выпустил новую щелевую форсунку, корпус которой, наподобие форсунки Ленца, был разделен продольной пластинкой. Регулирование количества нефти и пара, помимо кранов, как и в форсунке Ленца, производилось предварительной постановкой в выходное отверстие металлических пластин. Все движущиеся части Бенкстон удалил из форсунки, что позволило ему значительно удешевить и упростить ее. Несколько позднее Бенкстон еще более упростил свои щелевые форсунки. Они состояли (рис. 237) из труб *A* и *B*, сплюснутых на конце. По верхней трубе подавалась нефть, а по нижней — пар. Форсунка Бенкстона этой конструкции продавалась всего по 5 руб.

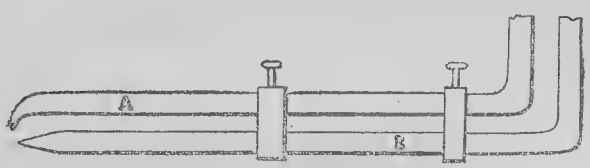


Рис. 237. Форсунка Бенкстона.

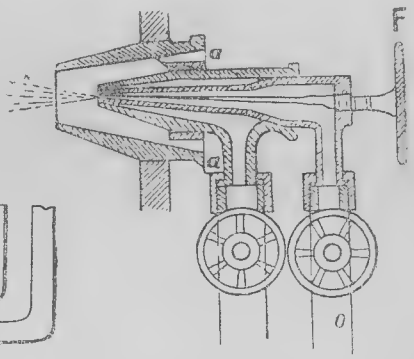


Рис. 238. Форсунка Бюреля.

156. Форсунка Сандгрена

Механик общества «Кавказ и Меркурий» Сандгрен, производя эксплоатационные наблюдения над работой форсунок Ленца, пришел к выводу, что золотники в форсунках Ленца усложняют и затрудняют регулировку процесса горения. Он решил выбросить из форсунок золотники со всеми их приспособлениями, а регулирование нефти и пара производить только клапанами, поставленными перед форсункой.

Форсунка Сандгрена, поставленная на пароходе «Шах» мощностью 70 *и. л. с.*, расходовала в час 5,85 *кг* на 1 *и. л. с.*, т. е. столько же, сколько расходовалось и антрацита. Эксплоатационные наблюдения показали трудность регулировки количества сжигаемой нефти только лишь клапанами перед форсункой.

В новом типе своей форсунки Сандгрен вновь применял золотники для регулирования расхода нефти. Установка золотника на определенный расход производилась перед включением форсунки в работу.

Сандгрен ввел еще одно важное усовершенствование, дающее возможность во время работы производить прочистку форсунки. Для прочистки нефтяной щели закрывали нефтяной клапан и открывали паровой клапан, перепускающий пар из парового корпуса форсунки в нефтяной.

Щелевые форсунки давали хорошую форму факела применительно к прямоугольным топкам, а также в том случае, если топка имела колосниковую решетку. Для постановки в круглые топки щелевые форсунки были мало пригодны, так как они давали плохое заполнение жаровой трубы плоским факелом. Стремление получить лучшее заполнение объема топки факелом побудило некоторых изобретателей применить к жаровым трубкам круглые форсунки.

157. Форсунки Бюреля (Burell)

Из большого числа круглых форсунок по своей простоте и практичности заслуживает особого внимания форсунка, построенная в Америке Бюрелем [1] (рис. 238).

В форсунку Бюреля нефть поступает по трубе *о* во внутреннюю трубу. Через последнюю проходит шток для регулирования расходуемого форсункой мазута. Пар поступает по другой трубке, обхватывающей нефтяную. Выходящая из форсунки паро-нефтяная струя распыливается и сгорает. Воздух для горения мазута частично поступает непосредственно к корню факела через каналы *аа*. Устройство насадка, окружающего форсунку, усиливает подсасывание воздуха через упомянутые каналы.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕФТЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ В РУССКОМ ВОЕННОМ ФЛОТЕ

Применение нефтяного отопления в русском военном флоте в сравнительно широком масштабе началось лишь с конца 90-х гг. прошлого века [2]. Эта нерешительность в переводе военных судов на нефтяное отопление отчасти объяснялась боязнью взрыва мазута в случае попадания снаряда в нефтехранилище.

Для выяснения возможности воспламенения нефти от попадания в систерну снаряда в 1887 г. в Петербурге были проведены следующие опыты. Стреляли из 37- и 47-*мм* орудий в систерны с нефтью, подогретой до 40—50°. Оказалось, что нефть не только не воспламенялась, но даже мало подогревалась.

Эти же опыты производились и в Тулоне. Стрельба по резервуарам с нефтью 47-*мм* снарядами также не произвела воспламенения [3].

Первые опыты с нефтяным отоплением на военных судах начались почти одновременно в 1883 г. на Черном и Балтийском морях. На Черном море испытывался миноносец «Батум», котлы которого были снабжены форсунками Ленца. Испытание нефтяного отопления на «Батуме» продолжалось около трех лет — с 1883 по 1886 гг. — и закончилось неудачей. Испытания миноноски «Жаворонок» на Балтийском море также не дали положительных результатов, хотя котлы «Жаворонка» были снабжены форсунками системы Нобеля, которые на судах товарищества бр. Нобель работали хорошо. Неодинаковые результаты работы форсунок Нобеля в торговом и военном флоте можно объяснить неподготовленностью эксплоатационного персонала на военных судах к обслуживанию нефтяных топок.

---

[1] Англ. пат. № 4723, 1882 г.; Морской сборник, № 8, стр. 6, 1869; Морской сборник, № 1, стр. 127—155, 1884.

[2] Голов. Современное положение нефтяного отопления паровых котлов на судах флота. Военные флоты и морская справочная книжка. Стр. 63—92, 1904.

[3] Yacht. 25/II 1893 г.

158. Топка Пашнина

В 1886—1887 гг. на миноносцах «Сова» и «Лук» были установлены специально сконструированные для нефтяного отопления котлы Пашнина. По мнению Пашнина, оборотный цилидрический котел являлся наиболее удобным типом котла под нефтяное отопление. Для достижения полного горения нефти Пашнин считал необходимым увеличить длину факела, так как он думал, что нефть для своего сжигания требовала большего времени, чем всякое другое топливо.

В своей топке Пашнин вводил воздух по всей длине факела. Воздушные трубы, по которым поступал воздух, тянулись по водяному пространству котла по всей длине жаровой трубы. Воздух из труб выходил через конусообразные насадки, выступающие из водяного пространства котла.

Испытания этого котла, проведенные 21 декабря 1886 г. на реке Неве, кончились неудачей. Котлы Пашнина были сняты с миноносца «Лук».

Спустя 13 лет после этих опытов, в 1900 г., положение с нефтяным отоплением на военных судах русского флота было критическим. Пашнин снова появляется на сцену и даже получает средства для проведения опытов сжигания нефти по его системе, основанной на отказе от подогрева нефти и вводе воздуха по всей длине факела. В топках цилиндрического котла, с которыми Пашнин проводил испытания, он нагородил настоящие баррикады из кирпичных порогов и сводов, что, по его мнению, должно было помочь горению. Но это не помогло, так как принцип, положенный им в основу сжигания нефти в топке, был в корне неправилен.

Этот факт указывает также и на то, что морское министерство, финансировавшее опыты, и специалисты того времени сами были некомпетентны в вопросах нефтесжигания. Все вышеупомянутые неудачи с применением нефтяного отопления на русских военных судах не охладили, однако, интереса к нефтесжиганию, а опыты, наоборот, усиленно продолжались.

На миноносце «Акула» были поставлены эксплоатационные наблюдения над работой форсунок Блюмера и Корбут-Лашкевича, но и эти опыты дали мало удовлетворительные результаты. Машины не могли развивать своей полной мощности, так как эти форсунки потребляли для распыливания нефти более 6% производимого машинами пара.

В 1890 г. на миноносец «Ракета» были поставлены специально построенные заводом Нобеля нефтяные котлы, испытание которых дало также неудовлетворительные результаты.

Несколько обнадеживающие данные дали опытные наблюдения на миноносце «Выборг» в 1890 г. На последнем параллельно испытывались две системы нефтяного отопления: Дреземейера и Шенсновича — Петрашевского.

159. Топка Дреземейера

Отличительной особенностью топки Дреземейера[1], как показано на рис 239, являлась массивная обмуровка стенок топочной камеры, сделанная из огнеупорного кирпича. С фронта котла устанавливались два ряда форсунок Ф, две вверху и четыре внизу. Против каждой верхней форсунки устанавливалась кирпичная колонка. Постановка этих колонок была вызвана стремлением защитить металлические стенки от непосредственного действия пламени.

[1] Стромейер. Морские паровые котлы. Перев. Голов. Стр. 490, СПБ. 1895.

Заметим, что в 80-х и 90-х гг. XIX в. при постройке многих нефтяных топок почти всегда делали основной упор на защиту стенок котла от непосредственного действия пламени посредством постановки кирпичной кладки. Воздух, необходимый для горения, вводился непосредственно к корню факела и через боковые отверстия в кирпичной кладке. Температура в топке поддерживалась высокая из-за наличия в ней массивной обмуровки.

Это преимущество вызвало и свои недостатки, а самый важный из них: увеличение веса котла за счет обмуровки. Из других недостатков топки Дреземейера следует указать на сложность управления горением и связанность одной форсунки с другими. Если засорялась одна форсунка, то на время ее прочистки приходилось останавливать все остальные форсунки.

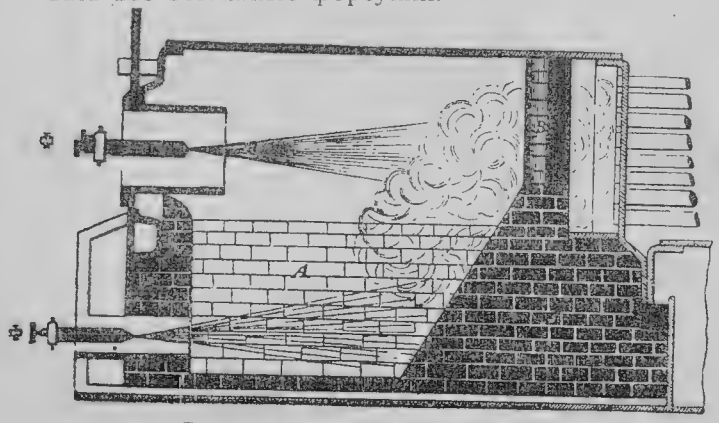


Рис. 239. Топка Дреземейера.

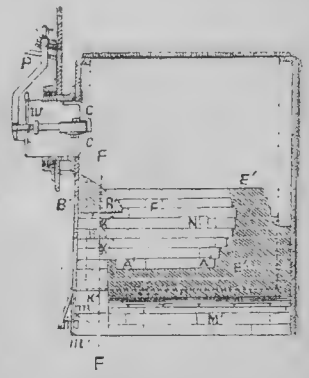


Рис. 240. Топка Шенсновича и Петрашевского.

160. Топка Шенсновича и Петрашевского

В 1890 г. лучшие результаты дала топка Шенсновича и Петрашевского (рис. 240), где форсунки работали независимо друг от друга. Нефть в этой топке направлялась из форсунки вниз на под кладки примерно под углом в 45° к горизонту. Ударяясь о под и заднюю стенку обмуровки, факел поворачивался и уходил в дымогарные трубки. Воздух для горения подавался в основном через каналы *K* и в небольшом количестве у основания корня факела. Результаты сравнительного испытания обеих топок закончились в пользу топки Шенсновича и Петрашевского [1] (табл. 75).

Таблица 75

Наименование	Система нефтяного отопления	
	Дреземейера	Шенсновича и Петрашевского
Давление пара в котле в *ати*	8,43	8,43
Часовая паропроизводительность котла в *кг* . .	3120	2800
Видимая испарительность топлива в *кг/кг* . . .	12,12	13,82

[1] Морской сборник № 2, 1894.

Расход нефти на производство 1 *кг* пара в топке Дреземейера был на 19% больше, чем в топке Шенсновича и Петрашевского. В связи с этим опыты с нефтяным отоплением продолжались только в последней топке. Несмотря на все опыты, в русском военном флоте количество судов, отапливаемых нефтью, насчитывалось единицами. В коммерческом же флоте к этому времени нефтяное отопление получило широкое распространение (табл. 76).

Таблица 76

Потребление топлива по водным путям Европейской России в 1886 и 1890 гг.

Год	Суда	Общее число судов	Род и количество топлива, потребляемого судами в одну навигацию					
			дрова		каменный уголь		нефтяные остатки	
			число судов	расход топлива в тыс. $м^3$	число судов	расход топлива в тыс. $т$	число судов	расход топлива в тыс. $т$
1886	Пассажирские пароходы . . .	167	77	233	64	22,8	6	3,85
1886	Товаро-пассаж. „ . . .	158	76	436	42	32,8	40	40,20
1886	Товарные „ . . .	67	1	0,97	60	30,3	6	4,60
1886	Буксиро-пассаж. „ . . .	153	97	350	43	11,6	13	12,20
1886	Буксирные „ . . .	811	380	1740	187	79,4	244	196,00
1886	Туеры	26	26	107	—	—	—	—
1886	Служебные пароходы	125	35	38,9	59	8,26	31	7,36
	Всего . .	1507	692	2905,87	275	185,16	340	274,01
1890	Пассажирские пароходы . . .	248	94	204	111	54,65	43	36,00
1890	Товаро-пассаж. „ . . .	179	49	252	55	45,1	75	87,00
1890	Товарные „ . . .	80	1	0,97	68	45,5	11	9,20
1890	Буксиро-пассаж. „ . . .	162	90	340	34	15,5	38	25,50
1890	Буксирные „ . . .	989	299	1310	219	104,2	471	415,00
1890	Туеры	26	16	39	—	—	10	1,80
1890	Служебные пароходы	140	24	19,4	76	17,6	40	5,90
	Всего . .	1824	573	2165,37	563	282,55	688	580,40

По данным этой таблицы, количество пароходов, отапливаемых мазутом, с 1886 по 1890 г. увеличилось с 340 до 688, т. е. почти в два раза. На всех этих пароходах применялись исключительно паровые форсунки. Все паровые форсунки имели важный недостаток — большой расход пара на распыливание мазута. Потребление пара на распыливание мазута в то время в среднем составляло от 6 до 8% от полной производительности котла.

В морских паросиловых установках этот недостаток был терпим до тех пор, пока давление в котле не превышало 2,5 *ати*, т. е. пока питание котлов производилось забортной морской водой.

Когда же давление пара в котле повышалось выше 2,5 *ати* и в рабочую схему паросиловой установки, ввиду необходимости питания котлов конденсатом, включали конденсатор, тогда применение паровых форсунок стало приносить большие затруднения.

Для понижения интенсивности накипеобразования в котле приходилось устанавливать дополнительные испарители для производства конденсата в количестве, равном расходу пара форсунками. Это было невыгодно, так как постановка испарителей требовала места для их расположения. Кроме того, необходимо было примерно на 15% увеличить поверхность нагрева котлов для производства пара, идущего на испарители, или повысить на 10% нагрузку котла путем интенсификации его работы.

Если котлы не допускали необходимой длительной перегрузки, то применение паровых форсунок влекло за собой и уменьшение мощности установки примерно на 10 %.

При постройке новых паросиловых котельных установок для покрытия расхода пара на испарители и форсунки необходимо было предусмотреть увеличение паропроизводительности котлов. Все это приводило к увеличению габаритных размеров и веса паросиловой установки и к понижению к. п. д. ее.

Иногда же судовые испарительные установки не позволяли получать в них необходимое количество дополнительного пара, идущего на паровые форсунки. Поэтому приходилось принимать на борт судна большое количество пресной воды за счет уменьшения запаса топлива. Для примера можно указать на опыты, производимые французским обществом «Forges et Chantiers de la Méditerrane» с заказанными ему миноносками для русского флота.[1] Во время испытания в 1883 г. выяснилась полная невозможность применения паровых форсунок для миноносок. Последние, чтобы сделать 1000 морских миль, должны были находиться в пути 91 час. За это время на распыливание мазута каждая миноноска требовала 4,2 *т* пресной воды. При существовавших тогда опреснительных установках такое количество пара на миноноске нельзя было получить.

В том же году попробовали заменить паровое распыливание нефти воздушным. По данным опытов при применении парового распыливания нефти, давление пара — 1,5 *ати* и 1 *кг* нефти испарял 10 *кг* воды. При распыливании же мазута сжатым воздухом давление пара — 0,8 *ати*, а испарительность нефти — 10,5 *кг/кг*. Из большого числа появившихся тогда воздушных форсунок наибольшего внимания заслуживает форсунка Джонсона, которая могла работать или паром, или воздухом.

161. Воздушная форсунка Дженсона (Jensen), 1883 г.

Устройство форсунки Дженсона ясно видно из рис. 241. Высота паровой и нефтяной щели в этой форсунке сделана равной 0,9 *мм*. Щеки *A* форсунки выполнены съемными, что позволяло весьма удобно производить осмотр и прочистку форсунки.

Регулирование расхода воздуха и мазута здесь производилось только клапанами *D* и *E*. Показанный на рис. 241 клапан *B* служил для спуска из паровой камеры форсунки конденсата.

---

[1] Морской сборник № 1, стр. 127—155, 1884.

В 1883 г. форсунки Дженсона были установлены на нескольких русских миноносках Черного моря.[1] Испытание рассматриваемой форсунки производилось на небольшом буксирном пароходе под котлом с поверхностью нагрева 17,036 $м^2$; давление пара в котле — 5,0 *ат*.

Рядом с этим котлом на пароходе был установлен вспомогательный котелок поверхностью нагрева 3,19 $м^2$, снабжающий паром машину, приводящую в движение воздушный компрессор. Если мазут распыливался не воздухом, а паром, то последний доставлялся этим же котелком. В табл. 77 для сравнения рядом даны результаты опытов на лучшем французском угле (брикеты d'Anrin).

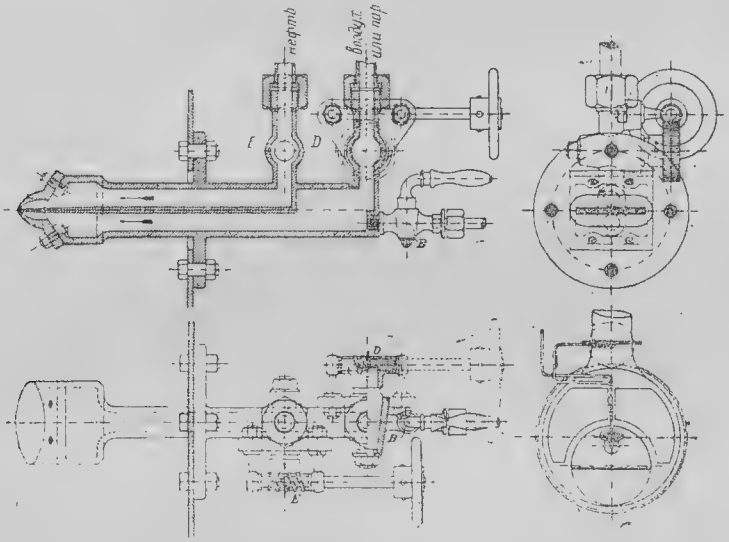


Рис. 241. Форсунка Дженсона (Jensen'a) .

Таблица 77

Время опыта	Продолжительность	Топливо	Распылитель	Давление распылит. пара или воздуха в *ати*	Температура воздуха перед входом в топку в °Ц	Видимая испарительность топлива
1883 г.						
22/II	5 ч. 40 м.	Каменный уголь				
14/II	4 ч. 50 м.					5,63
14/II	4 ч. 50 м.	Мазут	Пар	1,5		9,74
16/V	7 час.	„	„	1,5		10,36
7/V	8 „	„	Воздух	0,8	+ 142	10,39
9/V	9 „	„	„	0,8	+ 25	9,96
11/V	8 „	„	„	0,8	+ 125	10,63
12/V	7 „	„	„	0,5	+ 116	10,36

Данные табл. 77 указывают, что мазута на 1 *и. л. с. ч* расходовалось около 1,1 *кг*, т. е. примерно в 2—7 раз меньше, чем у других выше рассмотренных форсунок. При употреблении воздушных форсунок отпадала необходимость постановки дополнительных испари-

[1] Морской сборник № 1, 1884.

телей. Самый важный недостаток паровых форсунок — большой расход пара на распыливание мазута — остался в силе и при применении воздушных форсунок.

При употреблении последних количество пара, расходуемого на приведение в действие воздушных компрессоров, было примерно таким же, как и при пользовании паровыми форсунками.

К недостаткам воздушных форсунок следует отнести и большой вес компрессоров и возможности перебоя в доставке к форсункам сжатого воздуха, а также зависимость отопления от надежности работы компрессоров. Возможные повреждения компрессоров влекли за собой вынужденную остановку котлов.

Таким образом и паровые и воздушные форсунки вследствие большого количества их недостатков стали уже тормозить развитие нефтесжигания. Для выхода из положения некоторые изобретатели разработали так называемые механические форсунки, в которых они отказались от применения в качестве распылителей пара и воздуха и заменили их энергией давления мазута, создаваемой насосами.

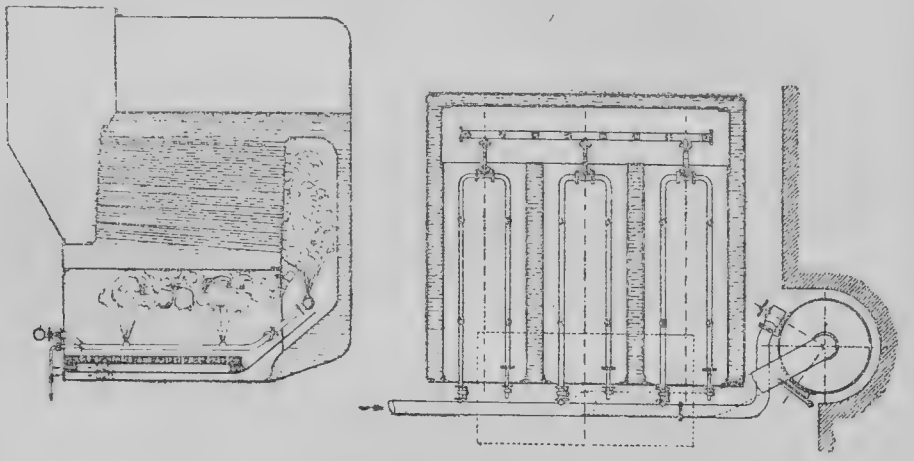


Рис. 242. Топка Дорсета.

162. Механические форсунки

Идея устройства механических форсунок была дана уже давно. Еще в 1863 г. Адамс[1] производил пульверизацию действием сильного давления нефти, которую он вводил в форсунку под давлением сжатого воздуха.

Далее Дорсет[2] предлагал для сжигания жидкого топлива на колосниковой решетке располагать V-образно изогнутую трубку, в которой просверливался ряд отверстий диаметром 1,6 *мм* (рис. 242). Выходящая из этих отверстий нефть распыливалась под давлением 2 *ати*. Нефть в трубку накачивалась насосом. Горение нефти в аппарате Дорсета для того времени происходило хорошо, что отчасти зависело от предварительного нагревания нефти перед сжиганием до 360° Ц. Нагревание происходило и в V-образной трубке за счет теплоты, излучаемой топочными газами

---

[1] Engl. Specif. № 3195, 1863. Abridg., v. 30, p. 1015.

[2] Petroleum furnace for heating ships plates. Specif., № 510, 1864; Brev. d'invention. № 799015, 1868; Морской сборник, № 10, стр. 133, 1868.

Более совершенные конструкции механических форсунок появились в 90-х гг. прошлого века. Таковы, например, механическая форсунка Г. Д. Свенсона и К° и О. С. Петерсона (заявленная в России 18 августа 1895 г. за № 162).

Наибольший интерес представляет механическая форсунка Кертинга.

163. Форсунка Кертинга

Устройство форсунки Кертинга[1] показано на рис. 243. Нефть перед поступлением в топку нагревалась примерно до 90° Ц; затем по нефтепроводу она поступала в форсунку через наконечник *N*, имеющий большое число отверстий диаметром около 2 *мм*. Проходя через отверстия, нефть фильтровалась, что уменьшало вероятность засорения форсунки. Затем нефть направлялась в канал *M* и трубку *B*. Из последней она проходила через ряд цилиндрических каналов втулки *D*. В осевой канал этой втулки входил шпиндель *K*.

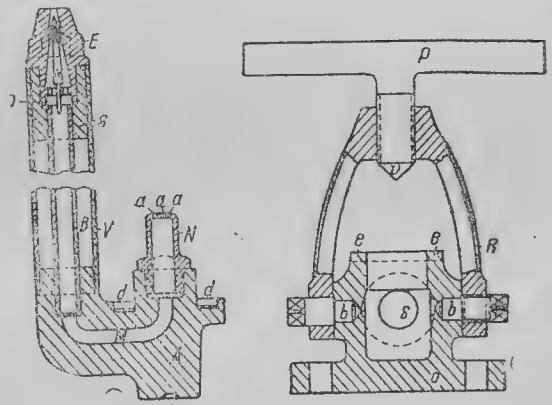


Рис. 243. Форсунка Кертинга.

Перед выходом из форсунки нефть распределялась по выточенным на шпинделе *K* винтовым каналам. Там она получала вращательно-поступательное движение и выбрасывалась в топку, где и сгорала в виде полого конуса. Форсунка Кертинга крепилась в воздухонаправляющем устройстве топки (рис. 243а) посредством чугунной отливки *o* и стальной скобы *R* с молоткообразным винтом *P*. Делалось это так: форсунка вставлялась в воздухонаправляющее устройство так, чтобы выступ отливки *o* вошел в выточку *d* на форсунке. В этом случае наконечник *N* входил внутрь чугунного стакана отливки *o*.

Затем, вращая винт *P* и направляя его наконечник в углубление *J*, плотно прижимали форсунку *K* к детали *A*. Для устранения просачивания нефти через выточку *a* рекомендовалось ставить свинцовую прокладку. Нефть из трубопровода через патрубок *s* отливки *o* поступала в пространство, окружающее наконечник *N*. Через отверстия *aa* последнего нефть вступала в форсунку.

Форсунка Кертинга со всеми ее приспособлениями показала в эксплоатационной проверке весьма хорошие качества. Механическая форсунка Кертинга с отверстием для выхода мазута в 1,5 *мм* была испытана в русском военном флоте 4 июня 1897 г. и 14 октября 1898 г.

Для сравнения с механической форсункой параллельно испытывалась паровая форсунка Калашникова. Последняя давала сильный шум и требовала частой разборки для прочистки, несмотря на постоянную регулировку. При употреблении паровых форсунок для отопления котлов пар держался плохо. Значительно лучшие результаты дала

[1] DRP. № 158492 за 1901 г.

механическая форсунка. Пар в котлах держался почти без колебаний, несмотря на то, что вентиляторное дутье не действовало. При угольном отоплении при одинаковых условиях наблюдалось значительное колебание давления.

Регулирование количества воздуха, вводимого в топку, производилось заслонками у фронта топок. Нефть нагнеталась в форсунки под давлением в 3 *ати*. Удельный вес сжигаемой нефти — 0,9. Перед поступлением в форсунки нефть подогревалась в нефтяных подогревателях примерно до 95° Ц и пропускалась через фильтр. Благодаря этому форсунки работали исправно.

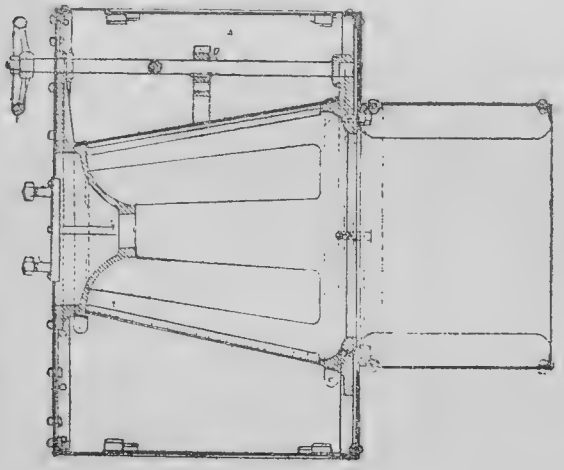


Рис. 243а. Воздухонаправляющее устройство Кертинга.

Однако, бездымности достигнуть не удалось. Температура в котельных колебалась от 40 до 57° Ц. При такой температуре условия для работы кочегаров были весьма тяжелы, несмотря на то, что нефтяное отопление не требовало от них большого напряжения сил непосредственно для работы. После того как было налажено вентиляторное дутье, дымность горения уменьшилась; температура в котельных понизилась, что улучшило условия для работы кочегаров.

Расход мазута на 1 *и. л. с. ч* при работе форсунок Кертинга составлял всего 0,63 *кг/и. л. с. ч*.

164. Результаты применения нефтяного отопления в русском военном флоте в конце 90-х гг. XIX в.

Комиссия, проведшая испытания котла на броненосце «Ростислав» (рис. 244), записала следующие преимущества нефтяного отопления с механическими форсунками.[1]

1. Простота устройства форсунки.
2. Полное отсутствие дыма.
3. Отсутствие потерь пресной воды, идущей при отоплении в паровых форсунках на распыливание мазута.
4. Ненужность постановки испарителей, которые увеличивали общий вес силовой установки (например для броненосца «Ростислав» их вес мог дойти до 70 *т*) и требовали для своего размещения значительного объема.
5. Уменьшение числа кочегаров.
6. Малая вероятность засорения механических форсунок, тогда как паровые форсунки требовали частой прочистки.
7. Возможность при наличии ручного нефтяного насоса производить приготовление котла в действие без применения пара.

Ввиду удачных результатов испытания на миноносце «Выборг» и броненосце «Ростислав» было предложено проводить опыты по неф-

[1] Военные флоты и морская справочная книжка на 1904 г., стр. 65.

тяному отоплению и в топках под водотрубными котлами. В конце 1896 г. было приказано приспособить все котельные установки миноносцев к нефтяному отоплению.[1]

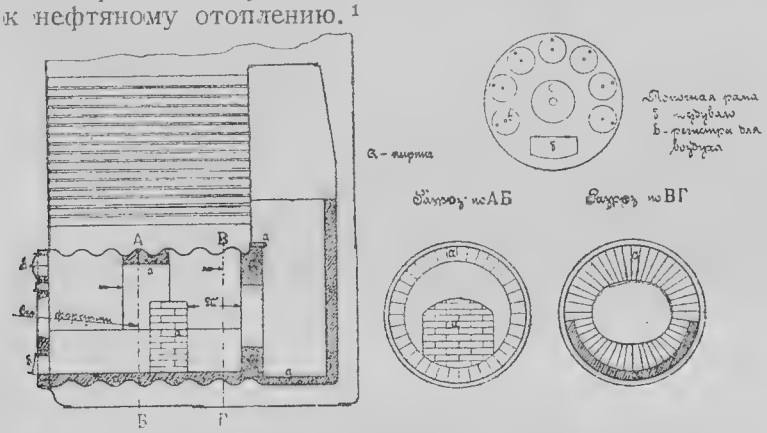


Рис. 244. Котел нефтяного отопления на броненосце „Ростислав".

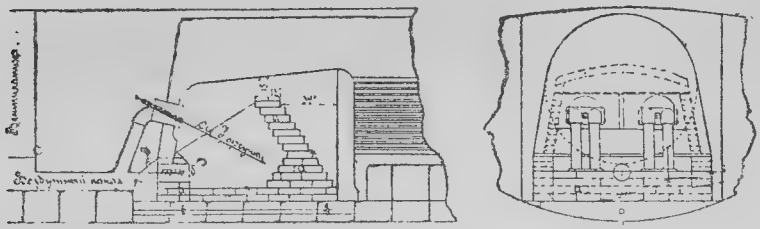


Рис. 245. Котел нефтяного отопления на миноносце № 260.

В марте 1897 г. было вынесено постановление вводить нефтяное отопление во всех строящихся миноносцах и минных крейсерах, а на вновь строящихся броненосцах только часть котлов приспособлялась под нефтяное отопление, главным образом, для обучения кочегаров, обслуживающих его.

После получения удовлетворительных результатов испытания котлов на нефтяном отоплении (рис. 245) на миноносце № 260 в Черном море, такую же систему отопления ввели и на миноносцах 271, 272, 273 и крейсерах «Гридень» и «Казарский» (рис. 246).

В том же 1897 г. в Балтийском море вводится нефтяное отопление на миноносцах 127, 138, 139, 140, 141, 142 с котлами Дю-Тампля и Нормана.

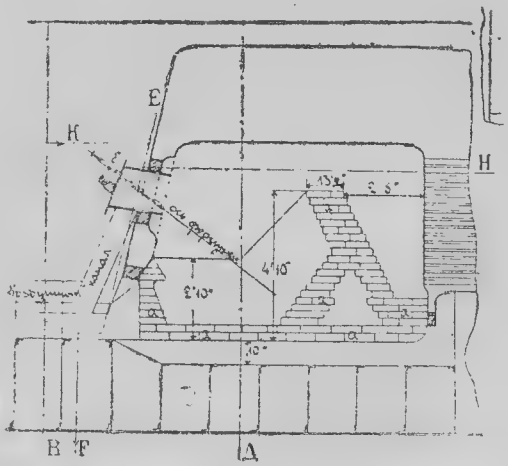


Рис. 246. Котел нефтяного отопления крейсера „Казарский".

[1] Военные флоты и морская справочная книжка на 1904 г., стр. 85.

6 июня 1901 г. были проведены первые опыты по нефтяному отоплению в Севастопольском порту над котлом Бельвиля постройки 1896 г. Поверхность нагрева котла была равной 138,1 $м^2$. Топка котла показана на рис. 247. Результаты проведенных опытов приведены в табл. 78.

Таблица 78

Давление пара в котле	15—16 *ати*
Давление нефти в подогревателе	9,5—9 *ати*
Температура нефти в подогревателе	120—130°Ц
Температура питательной воды	25°Ц
Испарено воды за час	3375 *кг/ч*
Сожжено мазута	263,5 *кг/ч*
Видимая испарительность мазута	12,8 *кг/кг*
Давление воздуха в воздуховодах	10—12 *мм*
Паронапряжение поверхности нагрева котла	24,4 *кг/м²ч*

По данным этой таблицы результаты опытов получились весьма хорошие, особенно была высока испарительность топлива.

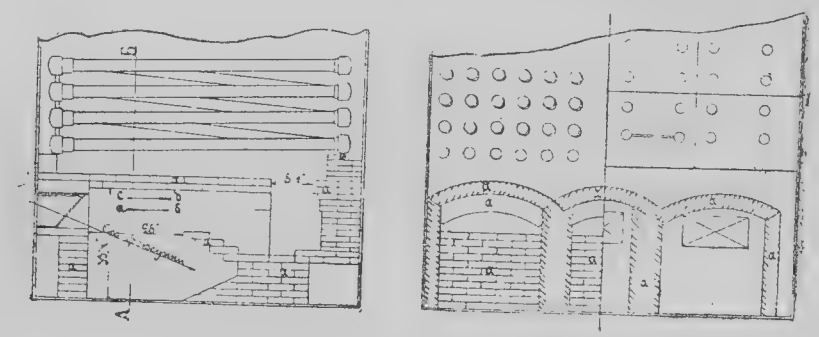


Рис. 247. Нефтяная топка под котлом Бельвиля.

После уже достигнутых успехов в освоении нефтяного отопления под судовыми котлами на военных судах из-за целого ряда эксплоатационных неудач наступил период дискредитации идеи нефтесжигания.

Так, например, тот же броненосец «Ростислав», на котором раньше были получены удовлетворительные результаты нефтесжигания, в плавании 1900 г. потерпел много аварий. На пути «Ростислав» сопровождали черные тучи густого дыма, выходящие из его дымовых труб. Эти огромные облака заволакивали весь видимый горизонт. В топках же развивалась настолько высокая температура, что плавилась кирпичная кладка, образовывались течи в трубной решетке, газовой коробке и швах. В результате всего этого первыми выходили из строя один за другим вспомогательные котлы, потом трехтопочные ординарные и, наконец, двойные шотландские котлы. Эти неудачи отчасти можно было объяснить наличием в топке обмуровки, покрывающей большую часть поверхностей топки.

Еще бо́льшие неудачи были получены при эксплоатационных наблюдениях на миноносцах № 260, 263, 271, 272, 273 и на крейсерах «Гридень» и «Казарский».

Для сравнения полученных результатов при отоплении углем с механическими и паровыми форсунками, кроме вышеупомянутых эсмин-

цев, эксплоатационные наблюдения проводились и на миноносцах № 266, 268 и 270.

Чтобы получить более точные сравнительные данные, старались создать одинаковые условия эксплоатации судов. С этой целью однотипные суда объединялись в следующие отдельные группы:

1. Миноносец 260 («Анакрия») с механическими форсунками и топками инженера Шенсновича и параллельно ему миноносец № 268 типа «Анакрия» с угольным отоплением.

2. Миноносец № 262 с паровыми форсунками Янушевского и параллельно ему однотипный миноносец № 266 — угольный.

3. Миноносцы типа «Пернов» с механическими форсунками (у миноносца № 271 топки Шенсновича; у миноносцев 272 и 273 (рис. 247а) топки Севастопольского порта). Параллельно с ними испытывался на угольном отоплении миноносец № 270.

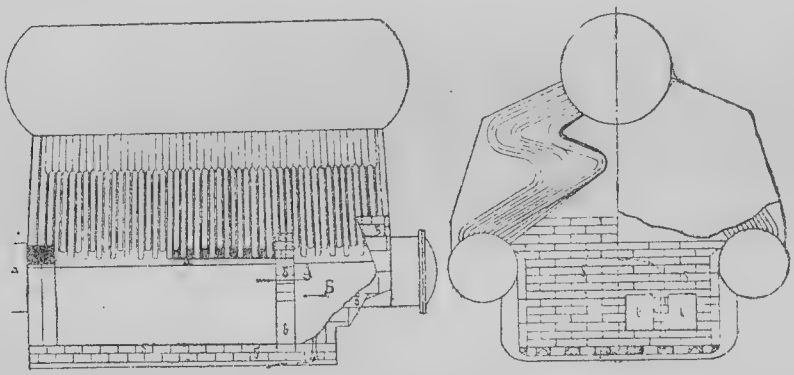


Рис. 247а. Котел нефтяного отопления миноносца № 273.

4. Миноносец № 259.

5. Минные крейсера «Гридень» и «Казарский». Последние три судна были снабжены механической пульверизацией Севастопольского порта. Миноносец № 259 и крейсера «Гридень» и «Казарский» не имели однотипных с ними судов с угольным отоплением, поэтому эксплоатационные наблюдения у них производились на тех ходах, для которых были известны расходы угля.

Во время испытания суда выходили в море в строе двух кильватерных колонн.[1] Однотипные суда держались друг у друга на траверзе (напротив). Обе колонны равнялись по очереди: правая по левой и наоборот. Наблюдения производились через каждые ¼, ½, 1 час в зависимости от хода и продолжительности испытания. Наибольшее внимание при испытании уделялось измерению расхода угля и мазута. Последние взвешивались с той точностью и аккуратностью, которую только возможно было достигнуть на практике.

Табл. 79 показывает основные характеристики работы паросиловой установки на этих судах.[2]

---

[1] Строй судов в одну линию друг за другом.

[2] Военные флоты. Стр. 75, 1904.

Таблица 79

Расход топлива на 1 морскую милю в килограммах

Название хода	Время и скорость при испытании	Способ отопления	1-я группа				2-я группа				3-я группа	
			Миноносцы				Миноносцы				Кр. „Гридень“	Кр. „Казарский“
			№ 260	№ 268	№ 263	№ 266	№ 270	№ 271	№ 272	№ 273		
			механическая форсунка Шенсновича	угольное отопление	паровая форсунка Янушевича	угольное отопление	угольное отопление	механич. форсунка Шенсновича	Нефтяная топка Севастопольского порта (механическая форсунка)		Нефтяная топка Севастопольского порта (механическая форсунка)	
Эскадренный	8 узлов в продолжение 10 часов	Расход мазута в *кг*	20,1	—	16,38	—	—	32,7	25,9	43	31,1	22,9
		Расход угля в *кг*	—	14,3	—	11,55	19,2	—	—	—	-	24,6
		Отношение $\frac{\text{мазут}}{\text{уголь}}$	1,40		—	1,41	—	1,71	1,35	2,236	-	0,933
		Дымность	все время светлый	темносерый (1,5 ч.)			бурый при забрасыв.	прозрачн. все время	серый два часа	черный все время	серый все время	0
Экономический	I гр. 11 узл. в прод. 10 ч. II гр. 11 узл. в прод. 8 ч. III гр. 12 узл. в прод. 6 ч.	Расход мазута в *кг*	19	—	21,3	—	- -	30,3	37,5	—	41	29,5
		Расход угля в *кг*		18,3	—	16,2	28,7	—	—	—	—	41
		Отношение $\frac{\text{мазут}}{\text{уголь}}$	1,036		—	1,313	- -	1,057	1,307	—	—	0,72
		Дымность	все время серый		0	серый 2 ч. в начале испытания	прозрачный все время			—	черный все время	0
Полный продолжительный	I гр. 14 узл. в прод. 5 ч. II гр. 16 узл. в прод. 5 ч. III гр. 16 узл. в прод. 6 ч.	Расход мазута в *кг*	31,3	—	23,6	—	—	38,3	60,3	47	—	42,2
		Расход угля в *кг*	—	30,3	—	27,5	35	—	—	—	—	52
		Отношение $\frac{\text{мазут}}{\text{уголь}}$	1,033			0,857	—	1,1	1,73	1,35	—	0,81
		Дымность	серый все время	желто-сер. все время	серый по временам	2 ч. вначале	прозрачный при подбрасывании	прозрачный все время	серый все время	черный все время	-	0
	№ 260 и 268 16 узл., 280—18, 263 и 266—15, 270 271 и 272 — 18 узлов	Расход мазута в *кг*	51,3	—	32	—	—	62,5	68	70	—	55
		Расход угля в *кг*	—	46,2	—	42,6	93	—	—	—	—	98
		Отношение $\frac{\text{мазут}}{\text{уголь}}$	1,11			0,754	0,675	0 675	0,675	0,756	—	0,558
		Скорость хода	16	16	15	15	18	20	20	17.5	—	18,8
		Дымность	черный все время	прозрачный все время	серый временами		0	черный все время			—	серый все время

Эксплоатационные наблюдения над котлами на упомянутых судах выявили и преимущества нефтяного отопления в сравнении с угольным:

1) меньшая физическая напряженность кочегаров,
2) уменьшение количества обслуживающего котлы персонала,
3) легкость поддержания пара на одинаковом уровне,
4) легкость обслуживания котлов и при форсированной их работе,
5) экономичность и удобство поддерживания пара в котле при нефтяном отоплении,
6) удобство и легкость приемки мазута. Возможность погрузки мазута во всякую погоду и на якоре и на ходу.

Данные табл. 79 указывают, что расход мазута был меньше расхода угля лишь при наибольших ходах, и, наоборот, во время эскадренного, экономического и полного ходов расход мазута превышал расход угля в 2,2—1,2 раза.

При нефтяном отоплении судов наблюдались следующие недостатки:

1) большая дымность,
2) ухудшение условий работы кочегаров из-за выбивания из топок и дымоходов вредных газов,
3) низкая экономичность работы силовой установки,
4) неравномерное заполнение топки факелом,
5) быстрое разрушение топочной обмуровки.

Устройство нефтяных топок было очень несовершенно. Пороги и своды топок загромождали топочное пространство, затрудняли осмотр и очистку их, а главное увеличивали вес котла (табл. 80).

Таблица 80

№ по порядку	Наименование	Число котлов	Вес нефтяного отопления в *кг*						Увеличение углубления судна при увеличении веса нефтяного отопления *мм*
			Вес приб. собств. нефт. отопления (по накладной Балт. зав.)	Вес воздухоподводящих и пр. устройств	Кирпичная кладка вместе с глиной	Полный вес нефтяного отопления	Вес снятого устройства угольн. отопления	Увеличение веса при нефтяном отоплении	
1	Мин. кр. „Казарский"	2	3292	410	5242	8944	5290	3653	31,75
2	„ „ „Гридень"	2	3292	410	5242	8944	5290	3653	31,75
3	Миноносцы № 252	1	1638	147	2212	3996	1883	2113	38,1
4	Миноносцы № 254	1	1425	213	2212	3849	1883	1966	50,8
5	Миноносцы № 258	1	1425	197	2212	3833	1883	1950	63,5
6	Миноносцы № 259	2	3292	328	4505	8125	3768	4357	101,6
7	Миноносцы № 267	1	1425	147	2212	3784	1883	1900	50,8

Неудовлетворительные результаты испытания нефтяных топок, а особенно большой перерасход мазута в сравнении с углем, явились причиной возврата военных судов русского флота к угольному отоплению. В марте 1902 г. выносится постановление о переводе всех миноносцев на угольное отопление. Для продолжения опытов с неф-

тяным отоплением на Балтийском море приказано было оставить один миноносец с водотрубным котлом.

Основными причинами получения неудачных результатов испытания нефтяного отопления были неправильные конструкции топок, нагромождение в них лишних сводов и порогов и несовершенный подвод воздуха. Еще более важной причиной неудач нефтяного отопления явилось отсутствие кадров, хорошо знающих технику сжигания нефти.

Значительно лучше обстояло дело с нефтяным отоплением за границей. Для примера рассмотрим опытные данные только нескольких французских военных судов.

НЕФТЯНОЕ ОТОПЛЕНИЕ ВОЕННЫХ СУДОВ В ИНОСТРАННЫХ ФЛОТАХ (90-е гг. XIX в.)

165. Нефтяное отопление котлов миноносца № 22

Нефтяная топка цилиндрического оборотного котла французского миноносца № 22[1] (рис. 248, 248а) весьма проста. Она не загромождена большими порогами. Необходимый для горения воздух под-

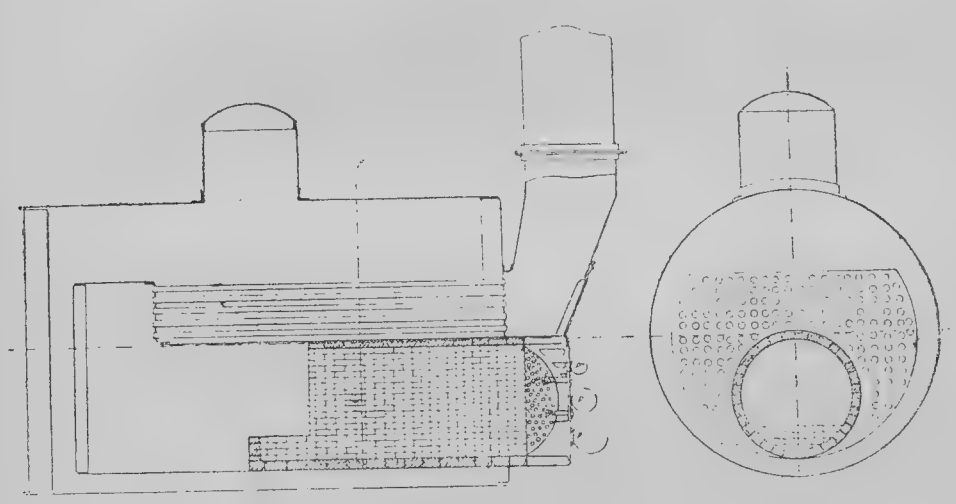


Рис. 248. Оборотный цилиндрический котел нефтяного отопления французского миноносца № 22.

водится только к корню факела через отверстия в полушаровой фронтовой решетке. С фронта котла предусмотрено отверстие *p* для вставки зажигательной форсунки. *p′p″* — отверстия для осмотра топки.

На рис. 249 показано устройство паровых форсунок миноносца № 22. В отверстие *A* поступает пар, а в отверстие *B* и по средней трубке входит мазут. Эта форсунка в начале 90-х гг. была принята в качестве основной для постановки ее на миноносцах. В ней для распыливания мог применяться и воздух. В этом случае в отверстие *A* вместо пара поступал воздух.

В табл. 81 даны важнейшие данные испытания котла миноносца № 22.

[1] Girard J. B. Chaudières marines. Стр. 340—390. Paris, 1897.

Таблица 81

Наименование	Обозначение	Размерность	Нефть				Уголь									
			Название судов				Название судов									
			миноносец № 66	миноносец № 22		миноносцы № 60 и 65	миноносцы III кл.	миноносцы № 65 и 74	миноносец № 87	миноносец № 60	миноносец № 130	миноносец № 147	коперское судно	„Ваиёт Willaumez“	„Sainte Barbe“
			система котлов													
			Гюйо	цилиндрический огнетрубный	Годара	локомотивный тип	локомотивный			Дю-Тампля				Годара	д'Аллеста
							тип B	тип C	тип F	тип H	четырехколенчатые			двухколенчат.		
Дата испытания	—	—	27/I 1895	7/I 1893	9/V 1893	9/VIII 1893	12/II 1889	6/VII 1888	25/VII 1891	13/IV 1893	15/X 1889	1/V 1895	10/VIII 1891	15/VII 1892	21/XI 1891	23/V 1890
Продолжительность испыт.	Z	час	2	1	2	2	2,3	3	3	3	2	2	3	3	2	2
Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	107,93	50,72	100	72,46	70,934	60,74	91,33	94,23	80	84,5	159,65	177	97,66	95
Вес котла с водой	$G_{к+в}$	$кг$	9557	7475	8620	9000	7917	7547	10154	11500	6830	7300	12570	11876	12631	12224
Давление в котле	$P_к$	$атм$	9	7,25	8,5	8,5	7,77	8,25	8,34	9,1	8,5	13	9,25	14	9,9	9,9
Давление воздуха в котельной	$\Delta S_к$	$мм$ вод. ст.	60	60	90	95	45	41	47	45	100	75	48	75	30	30
Часовой расход топлива	B	$кг/ч$	365	281	534	402	552	506	520	600	640	700	880	1180	493	520
Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	—	—	—	—	290	286	292	200	250	267	187	268	235	223
Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	„	38	65	44	54	52,8	58,5	45,3	44	51,2	50	43	48	40,5	47,5
Паропроизводительность котла	D	$кг/ч$	4130	3300	4420	3940	3732	3533	4133	4123	4100	4200	6896	8515	3910	4518
Испарительность топлива	H	$кг/кг$	11,30	11,75	8,30	9,75	6,76	6,98	7,95	6,87	6,40	6,05	7,77	7,21	7,95	8,7
Вес котла на 1 $т$ пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	$т/т$	2,3	2,26	1,95	2,28	2,13	2,14	2,46	2,79	1,67	1,73	1,84	1,39	3,23	2,68

Основные характеристики работы котла: $\frac{D}{H_к} = 65$ *кг* и $И_в = 11{,}75$ получились весьма хорошие.

В той же табл. 81 приведены данные испытания котла Пти-Годара, переоборудованного под нефтяное отопление. Как видно из рис. 250, 250 а, топка у данного котла располагается перед пучком труб. Воздух вводится с фронта котла и через отверстие плоского пода топки. На данных котлах применены четыре форсунки Миксте, поставленные с фронта топки. Давление нефти перед форсункой в зависимости от ее расхода колебалось от 0,5 до 4 *ати*.

Результаты испытания котла указывают на наличие больших тепловых потерь при сжигании нефти. Видимая испарительность топлива во время опытов равнялась всего 8,3. Это объясняется отчасти малым объемом топки и сравнительно запоздавшим вводом части воздуха (конец предтопка) (табл. 81).

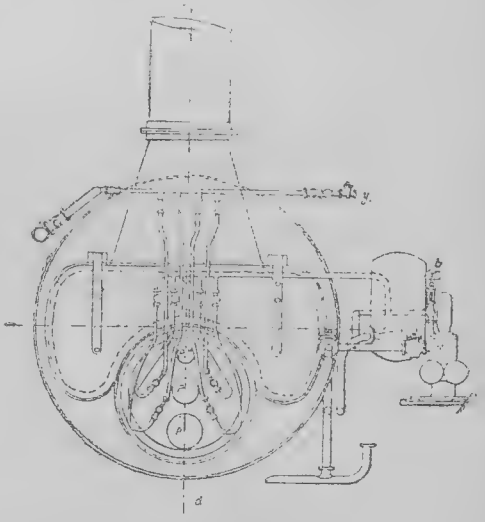


Рис. 248а. Оборотный цилиндрический котел нефтяного отопления французского миноносца № 22.

166. Котел нефтяного отопления Гюйо

Рассмотрим еще специально построенный для нефтяного ото-

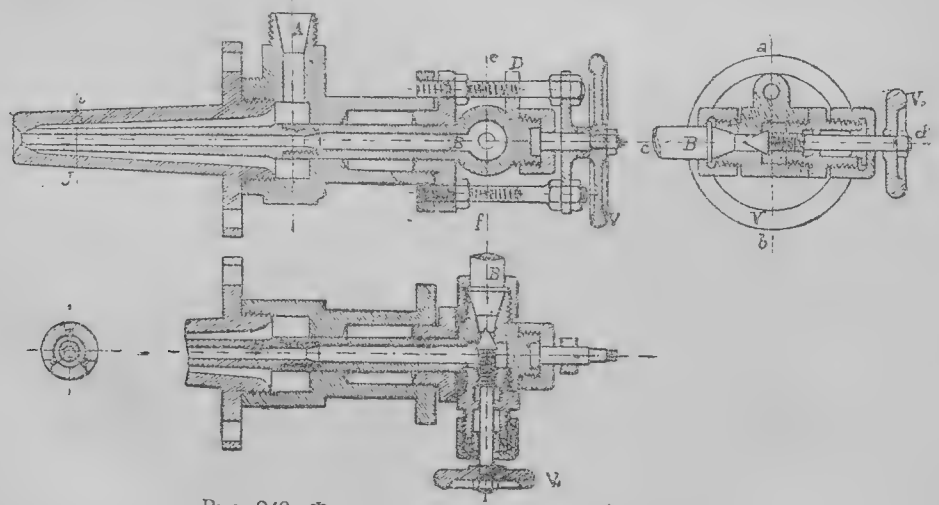


Рис. 249. Форсунка к котлу миноносца № 22.

пления котел Гюйо (рис. 251). Топка котла имеет предтопок длиной примерно 1 *м*. Устройство предтопка было продиктовано желанием улучшить условия зажигания нефти. Для усиления циркуляции котел был снабжен 4 циркуляционными трубами, как и в предыдущем котле, а также 4 форсунками. В табл. 82 приведены основные данные испытания котла Гюйо.

Таблица 82

№ по пор.	Наименование	Обознач.	Размерность	№ опытов		
				1	2	3
1	Число работающих форсунок			4	2	2
2	Часовой расход воды . . .	D	*кг/ч*	4130	1920	1380
3	Часовой расход нефти . .	B	»	365	160	110
4	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	11,3	12	12,5
5	Расход влажного пара на распыление	$D_ф$	*кг/ч*	230	55	25
6	Расход влажного пара на распыление на 1 *кг* сжигаемой нефти . . .	$\frac{D_ф}{B}$	*кг/кг*	0,63	0,345	0,225
7	Давление воздуха в котельной	$\Delta S_к$	*мм* рт. ст.	45	17	8
8	Открытие парового клапана у форсунки . . .		оборотов	1,5	1,0	0,55
9	Открытие нефтяного клапана у форсунки . . .		»	1,5	1,5	0,4
10	Давление нефти перед форсункой	$(P_н)'_ф$	*ати*	3,5	1,5	1,0
11	Паронапряжение пов. нагр. котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	38	18	13
12	Объем топки	$V_т$	*м³*	2,31	2,31	2,31
13	Введено тепла с топливом в топку	$Q_т$	*т · кал/ч*	3650	1600	1100
14	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	*т · кал/м³ч*	1580	700	475
15	Вес котла без воды	$G_к$	*кг*	6738	6738	6738
16	Вес котла с водой	$G_{к+в}$	»	9048	9048	9048
17	Вес котла с водой на тонну пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*т/т*	2,85	4,71	6,56

Приведенные данные о работе французских котлов с нефтяным отоплением указывают на то, что в средине 90-х гг. прошлого столетия Франция далеко обогнала Россию как в области освоения техники сжигания нефти и работы обслуживающего персонала, так и в области правильной разработки нефтяных топок.

Большие успехи в области нефтесжигания были достигнуты и в итальянском флоте. Там к концу XIX в. многие миноносцы были приспособлены к чистому нефтяному отоплению, а на броненосцах вводилось смешанное (угольное + нефтяное) отопление. Такое решение вопроса в то время считалось практичным, так как устройство топок под смешанное отопление не требовало капитальных переделок. Примерно такие же успехи в области нефтесжигания были достигнуты в Германии, Англии и США.

Несмотря на большие успехи в деле применения нефтесжигания в иностранных военных флотах, в России этот вопрос оставался неразрешенным вплоть до 1910 г.

167. Смешанное отопление

Недостаток нефти, стремление увеличить быстроходность военных судов и частично неудачи в освоении чисто нефтяного отопления побудили отдельные государства заняться переводом военных флотов на смешанное отопление.

Переделка топок под смешанное отопление заключалась лишь в том, что во фронтовую стенку топки ставили несколько форсунок

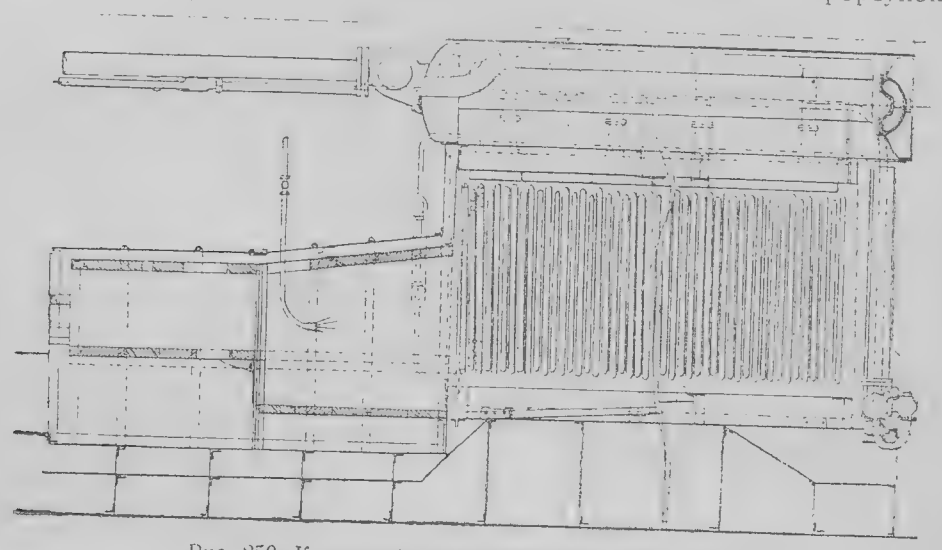


Рис. 250. Котел нефтяного отопления Пти-Годара.

(от 3 до 5 шт.) (рис. 252). Последние устанавливались обычно в один ряд над колосниковой решеткой.

Смешанное отопление позволяло увеличить радиус плавания судов, так как расход топлива (нефть + уголь) на 1 милю можно было значительно уменьшить. По данным эксплоатационных наблюдений в итальянском флоте, при смешанном отоплении 1 *кг* нефти был эквивалентен по паропроизводительности 1,57 *кг* угля.

В защиту перевода котлов под смешанное отопление пропагандировали также и владельцы каменноугольной промышленности, так как они боялись уменьшения поставок каменного угля для военного флота.

В начале XX в. 586 военных судов Англии потребляли около 3 млн. *т* угля из годовой добычи в 200 млн. *т*. К 1910 г. смешанное отопление применялось в Англии на 50 линкорах и крейсерах, а в Германии — на 36.

Однако, смешанное отопление судов прогрессировало недолго, так как эксплоатационные наблюдения выявили много его недостатков. Главные из них: необходимость иметь опытных кочегаров как по угольному, так и по нефтяному отоплению. При недостаточной квалификации кочегаров смешанное отопление почти не давало выгод в сравнении с чисто угольным, а только усложняло установку.

При переводе котлов на смешанное отопление в котельных нужно было устанавливать нефтяные насосы, подогреватели, нефтепровод, фильтры и т. д. Помимо этого, при смешанном отоплении не устранялись неудобства, связанные с погрузкой угля и подачей его к топкам. Но самым важным недостатком была трудность поддержания бездымного горения. Наибольшее дымообразование наблюдалось в периоды забрасывания угля в топку. В период загрузки угля к корню факела поступало значительно меньше воздуха, наоборот, весьма большое количество воздуха шло по линии наименьшего со-

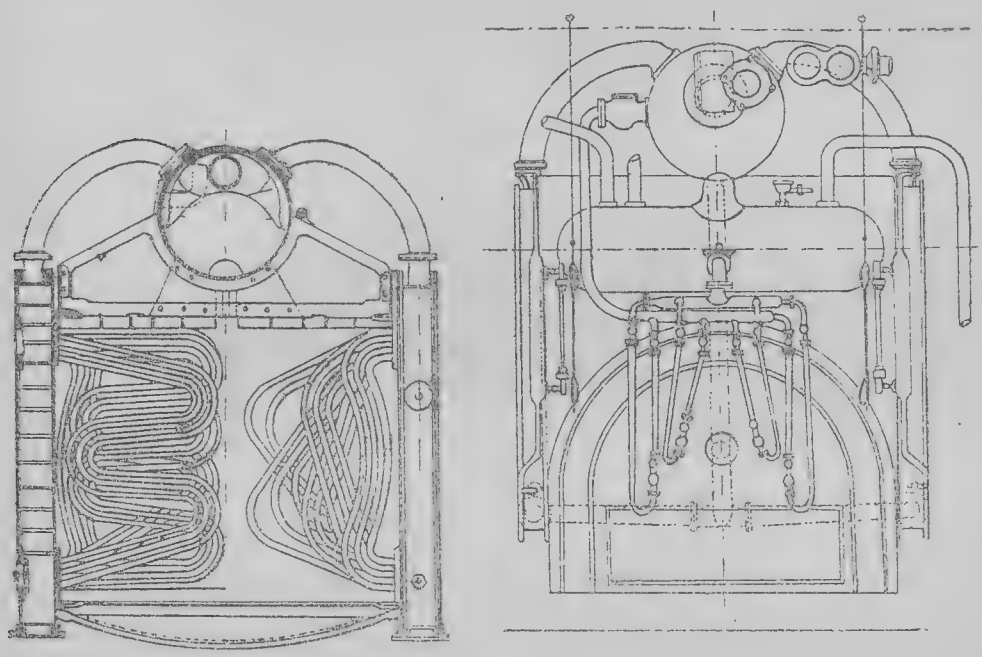


Рис. 250а. Котел нефтяного отопления Пти-Годара.

противления через топочные дверцы. Большая масса холодного воздуха, врываясь таким образом в топку, пронизывала факел почти по всей его длине. При недостатке воздуха у корня факела, это способствовало разложению нефтяных капелек на жидкие углеродистые соединения. Последние не успевали сгорать и выходили из дымовой трубы в виде черного густого дыма. Примерно такой же процесс, но в несколько меньшей степени, протекал и после закрытия топочных дверец, особенно в тех случаях, когда плохо регулировался подвод воздуха в топку (т. е. при значительном несоответствии с потребностями количества воздуха, подводимого к корню факела и в слой топлива).

Снова начали возвращаться к чисто нефтяному отоплению. Так, например, в Германии с 1908 г. на чисто нефтяное отопление переводилось по одному котлу из каждых трех, стоящих на миноносце. С 1911 г., в связи с подготовкой к новой империалистической войне, в Германии начали приспосабливать под нефтяное отопление и остальные два котла миноносцев. Одновременно производилась замена угольного отопления нефтяным у половины котлов на крейсерах и трети котлов у линкоров. Примерно так же шло развитие нефтя-

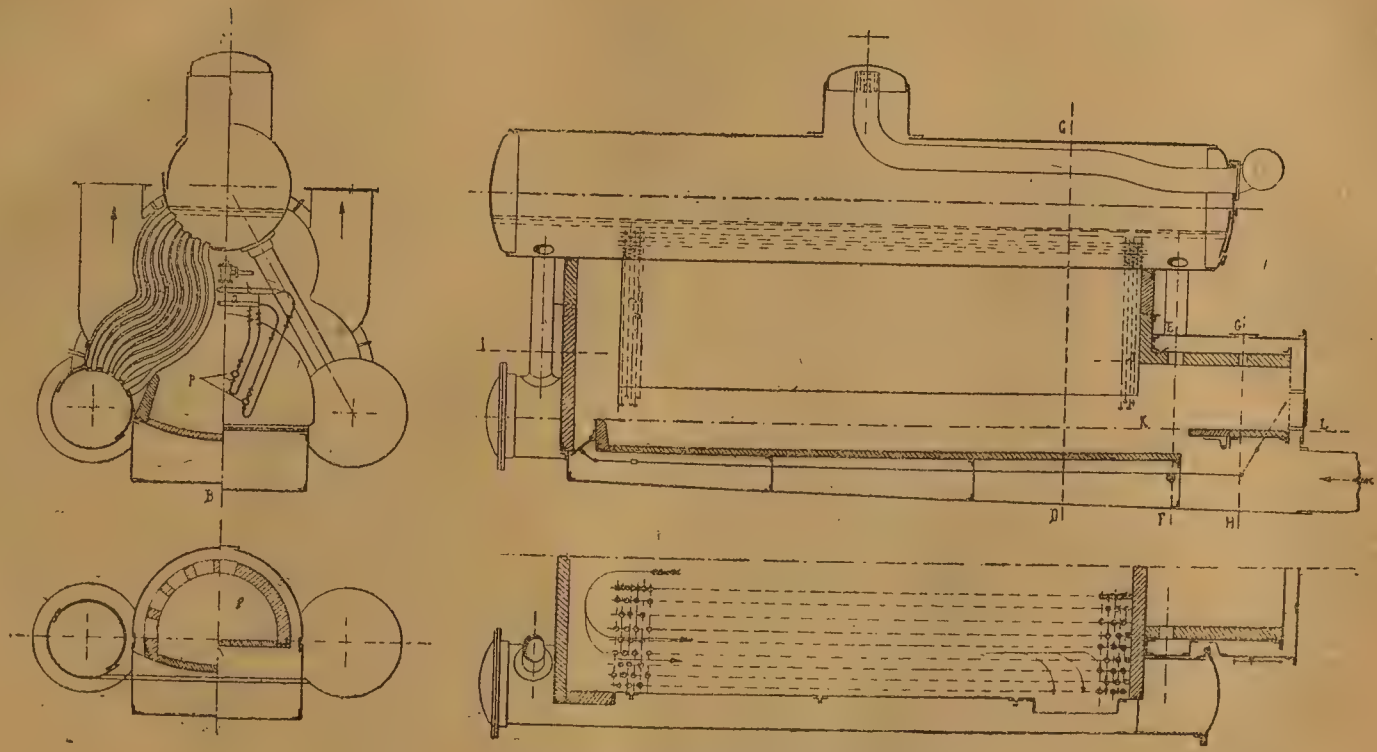


Рис. 251 Котел нефтяного отопления Гюйо.

ного отопления в Англии, Франции, Америке, Италии, Австралии и других странах.

Отсутствие больших запасов нефти и необходимость увеличения быстроходности судов, за счет интенсификации работы котлов, побудили Германию во время империалистической войны снова вернуться к приспособлению под смешанное отопление угольных котлов линкоров и крейсеров. Для уменьшения дымообразования все котлы смешанного отопления снабжались приспособлениями, которые автоматически уменьшали количество нефти, вводимой в топку при открытии топочных дверец. Применение этого изобретения дало некоторое уменьшение дымообразования.

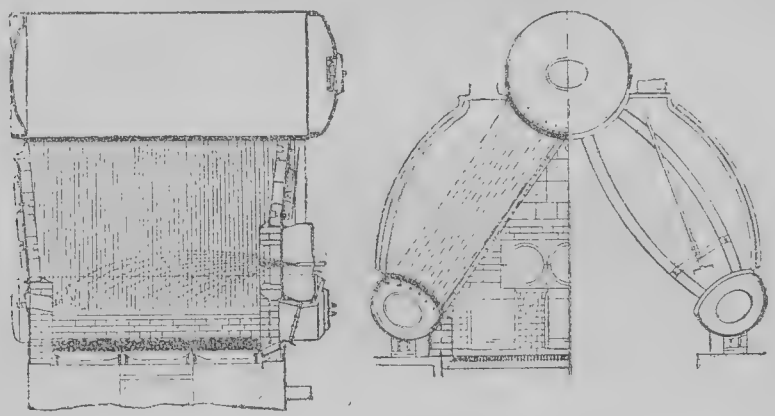


Рис. 252. Котел Ярроу смешанного отопления.

Мероприятия по переводу котлов военных кораблей на смешанное и чисто нефтяное отопления проводились буквально во всех морских державах.

Вопросами нефтесжигания занимались и многие исследователи. Подтверждением этого может служить большое количество печатных работ о нефтесжигании, на часть которых мы ссылались. Над переводом военных судов на нефтяное отопление работали в каждой стране десятки заводов, изготовляющих оборудование для нефтесжигания. Наконец, над вопросом нефтяного отопления работали тысячи изобретателей.

В результате этой упорной работы к 1910 г. уже повсеместно удалось выработать следующие правильные принципы нефтесжигания на судах:

1) применение механических форсунок,
2) увеличение давления в топке с увеличением числа работающих форсунок,
3) подвод воздуха только к корню факела,
4) подогрев нефти до 70—90° Ц,
5) давление нефти перед форсунками до 8—12 *ати*,
6) предварительное фильтрование нефти,
7) тепловое напряжение топки 1500—2000 *кал/м³ч*.

На достигнутых результатах не останавливались. Заводы и изобретатели продолжали работу над усовершенствованием форсунок и топок.

Только на одни форсунки в каждой морской державе заявлялись сотни патентов. Многие из этих патентов получили широкое приме-

нение на судах. Из всего этого большого числа форсунок рассмотрим еще три форсунки, получившие широкое практическое применение, а именно форсунки Шухова, Торникрофта и Рея.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СОВРЕМЕННЫХ ФОРСУНОК

168. Форсунки Шухова

Паровая форсунка инженера Шухова получила весьма широкое распространение, особенно у нас, в СССР. Как показано на рис. 253, она состоит из двух основных частей: из нефтяной трубки *1* и трубки *2*. Пар для распыливания поступает в кольцевое пространство трубок *1* и *2*.

Как показали опытные наблюдения, форсунка Шухова работает надежно и экономично, если соблюдаются нижеследующие условия:

1) давление форсуночного пара — 2—3,5 *ати*;

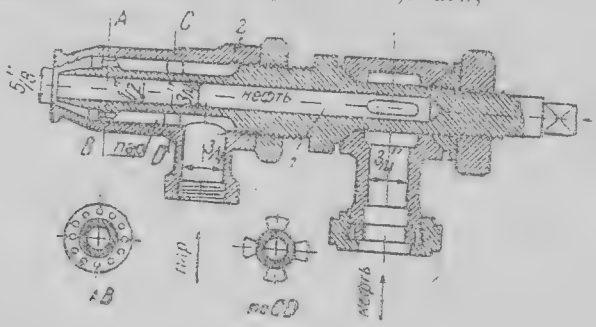


Рис. 253. Форсунка Шухова.

2) напор мазута — 0,3—0,5 *ати*, что достигается путем поднятия расходного бака на высоту 3—5 *м*;

3) при регулировке расхода нефти и форсуночного пара клапанами перед форсункой размер паровой щели должен по возможности не изменяться. Форсунки Шухова № 8 и 9 работали хорошо при величине паровой щели в 1 *мм*.

При умелом пользовании форсункой Шухова расходовали на распыливание 0,33—0,45 *кг* пара на 1 *кг* сжигаемого мазута.

Если же форсунки Шухова обслуживались малоквалифицированными кочегарами, то расход пара на распыливание мазута в них доходил до 0,6—0,8, а иногда даже до 1 *кг* на 1 *кг* сжигаемого мазута.

Весьма широкое распространение форсунки Шухова получили лишь в промышленности и на речных судах, так как там расход пара (пресная вода) не вызывал необходимости установки дополнительных испарителей, увеличения эксплоатационного персонала и т. д. На морских же судах эти форсунки почти не получили распространения.

В морских судовых котлах с начала XX в. применяются почти исключительно механические форсунки. Из последних наибольшее распространение получили форсунки Торникрофта и уже описанная форсунка Кертинга.

169. Форсунки Торникрофта

Устройство форсунки Торникрофта видно из рис. 254. Нефть для сжигания поступает в форсунку через патрубок. Затем нефть попадает в полый цилиндр, образованный шайбами *B* и *D*, через четыре

выреза шайбы *D* и два касательных канала в шайбе *B*. Пройдя касательные каналы, нефть в цилиндре получает вращательное движение и с большой скоростью выбрасывается в топку через небольшое круглое отверстие в шайбе *B*. Шайбы *B* и *D* плотно прижимаются к накидной гайке *E* посредством пружины *C*. Последняя другим концом упирается в фильтр *A*. Количество сжигаемой нефти в небольших пределах можно регулировать шпинделем.

Форсунка Торникрофта при правильно устроенной топке работает хорошо, если соблюдаются два важнейшие условия:

1) нефть перед поступлением в топку нагревается до 80—90° Ц,

2) нагнетание нефти в форсунки производится насосом под давлением в 8—12 *ати*.

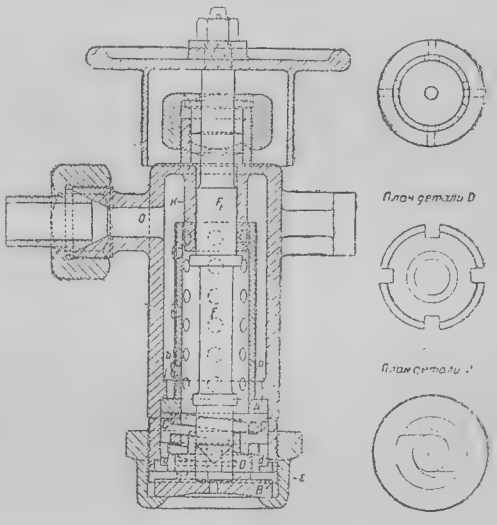


Рис. 254. Форсунка Торникрофта.

170. Форсунка Рея

Из других форсунок большой интерес представляет применяемая на американских судах вращающаяся форсунка Рея[1] (Ray W. R.).

Работа форсунки может быть представлена так. Чашка 4 (рис. 255) вращается с большой угловой скоростью. В нее вливается нефть из изогнутой неподвижной трубки. От вращения чашки нефть выбрасы-

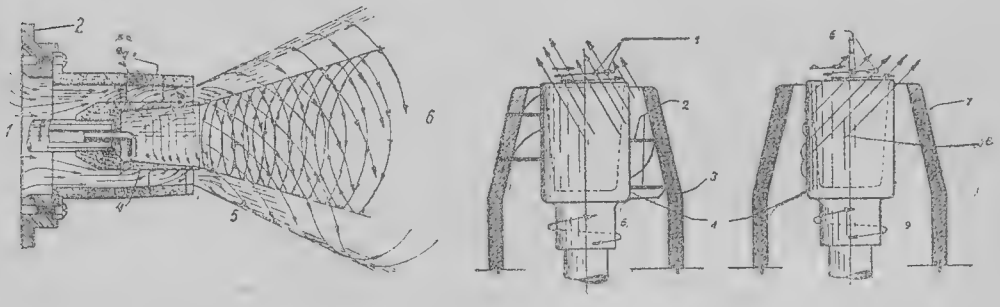


Рис. 255. Схема работы форсунки системы Рея.

1 — угол падения направления воздуха против направления вращения нефти. *2* — завихривающие воздух крылья с тангенциальным направлением лопаток. *3* — воздушное сопло с направляющими лопастями. *4* — распылительная чашка. *5* и *9*—направление вращения распыливающей нефти. *7*—воздушное сопло. *8*—действительное направление воздуха, возбуждаемое корпусом вращающейся распылительной чашки.

вается в топку в виде полого вихревого факела. Последний пронизывается воздухом, поступающим в топку через воздушную насадку, снабженную крыльями для завихривания воздуха (рис. 255). Воздух нагнетается в топку вентилятором, который вместе с чашкой *4* насажен на полый вал. Последний получает вращение от мотора или турбины (рис. 256). На этом рисунке буквой *A* обозначен распыли-

[1] Англ. пат. № 147826, 1914 г.; № 147827, 1915 г.; № 147828 и 147829, 1916 г.

тель, буквой *B* — паровая турбинка мощностью в 3 *л. с.*, буквой *C* — вентилятор. Нефть в форсунку поступает самотеком под небольшим напором, а поэтому нефтяной насос здесь не нужен.

Рассмотренная форсунка снабжена автоматическим регулятором подачи нефти и воздуха, работа которого зависит от давления пара в котле. При правильной отрегулировке форсунки, кочегарам почти не приходилось заниматься управлением горения.

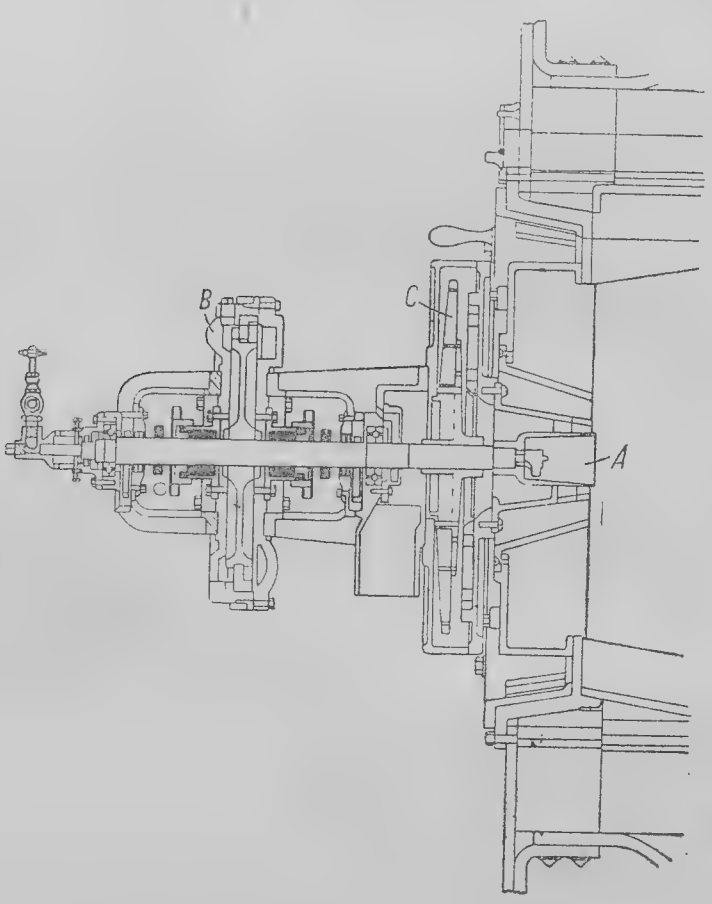


Рис. 256. Форсунка системы Рея.

Давление в котле изменялось на 0,35 *ати*. Эксплоатационные наблюдения выявили хорошую работу данной форсунки (относительно совершенное горение и равномерное распыливание). Струя нефти, выходящая из неподвижной трубки, не только разбивалась на мельчайшие капли о стенки быстро вращающейся чашки *4*, но нагревалась и даже частично испарялась за счет теплоты самой чашки и факела. На горение нефти оказывало благотворное влияние и хорошее перемешивание воздуха с пылеобразной струей мазута.

На рис. 257 показан котел Торникрофта новой конструкции. Котел снабжен четырьмя форсунками системы Рея. Верхняя центральная форсунка вращается от электромотора, а три нижние — от паровых турбинок. Такое устройство нефтяного отопления позволяет производить разводку паров легко, удобно и почти бездымно. Здесь

вентиляторное дутье работает с момента зажигания форсунки. В других рассмотренных системах нефтяного отопления при отсутствии пара разводку котлов бездымно производить не удается, так как там, из-за отсутствия дутья в котельную, воздуха к корню факела подводится недостаточно. Весьма важным недостатком этой форсунки следует считать чрезвычайную сложность ее.

Преимущества нефтяного отопления судов крайне обострили борьбу морских держав за нефтяные месторождения. Особенно большой антагонизм из-за нефти возник и продолжает проявляться между Англией, Францией, Германией, Италией и США.

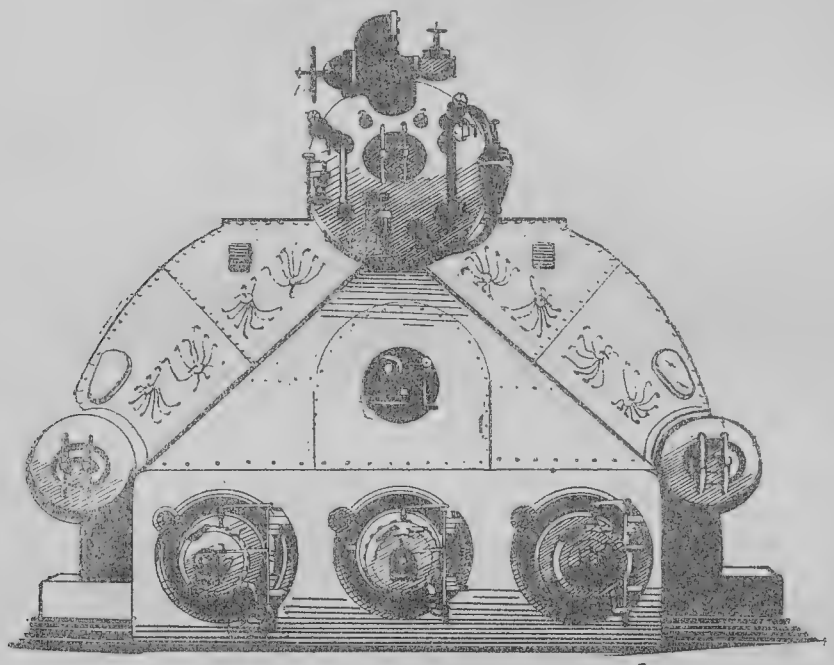


Рис. 257. Котел Торникрофта с форсунками системы Рея.

ВЫВОДЫ

1. К концу XIX в. угольное отопление на военных судах начинает тормозить развитие военного флота.

2. С 60-х гг. XIX в. вместо угольного отопления в военном и в коммерческом флотах начинают применять нефтяное отопление.

3. В процессе опытных и эксплоатационных наблюдений над сжиганием нефти выработались основные способы сжигания ее в топках паровых котлов (табл. 83).

4. Сжигание нефти на поду, в сосудах и на колосниковой решетке, а также с применением воздушных форсунок, не получило успеха.

5. Удовлетворительные результаты дало сжигание нефти посредством паровых и механических форсунок.

6. Наибольшее употребление на судах получили механические форсунки. Для их работы не требовалось большого расхода пара (0,2—0,3% против 6—10% у паровых форсунок). Потеря пресной воды (пара) вовсе отсутствовала.

7. В течение последних 40 лет XIX в. велась упорная работа над разработкой и испытаниями различных систем топок и форсунок.

В результате этой работы в конце XIX в. удалось понизить расход нефти до 1 *кг/и. л. с. ч* против 7—6 *кг/и. л. с. ч*, сжигавшихся в 70-х и 80-х гг. XIX в.

Таблица 83

Способ сжигания нефти	Подача нефти в топку
а) На поду топки	Заливалась вручную ковшами
б) В сосудах и на колосниковой решетке	Самотеком по трубкам
в) Посредством паровых форсунок	Самотеком под небольшим напором (3—5 *м*)
г) Посредством воздушных форсунок	Самотеком под небольшим напором (3—5 *м*)
д) Посредством механических форсунок	Насосом (давление нефти до 12 *ати*)

8. За последние 40—50 лет отдельные государства ввели в своих военных флотах смешанное отопление (нефть + уголь). В качестве основных причин применения смешанного отопления на судах следует считать:

а) недостаток нефти в отдельных странах,

б) неудачи с освоением чистого нефтяного отопления,

в) стремление увеличить быстроходность военных судов и обеспечить работу механизмов для полного хода.

9. Эксплоатация смешанного отопления на судах военного флота выявила целый ряд его недостатков:

а) трудность поддержания бездымного горения,

б) усложнение котельной установки и увеличение ее веса.

В котельной, кроме приспособлений для угольного отопления, ставились еще нефтяные насосы, фильтры, нефтеподогреватели, форсунки, воздухонаправляющие устройства, нефтепроводы и т. п.

10. В России вследствие ее консерватизма и большой технической отсталости применение нефтяного отопления долгое время тормозилось.

На пороге XX в. русский военный флот показал всему миру, как не надо внедрять нефтяное отопление на военных судах. Массовое внедрение нефтяного отопления на военных судах русского флота при незнании правильных принципов нефтесжигания вызвало большой перерасход нефти, в 2—1,5 раза превышавший расход угля.

Это побудило морское министерство отдать распоряжение об обратном переводе котлов на военных судах с нефтяного на угольное отопление.

11. Перевод на нефтяное отопление военных флотов потребовал громадного количества нефти.

12. Борьба за колонии с нефтяными месторождениями явилась одной из главных причин, вызвавших империалистическую войну 1914—1918 гг.

13. Изучение процессов горения, длительные эксплоатационные и опытные наблюдения над работой нефтяных топок лишь к 1910 г. позволили наметить правильные принципы сжигания нефти в судовых котлах посредством механических форсунок:

а) подвод воздуха только к корню факела,

б) увеличение давления в топке с увеличением числа работающих форсунок,

в) подогрев нефти до 70—90° Ц,

г) давление нефти перед форсунками до 8—12 *ати*,

д) предварительное фильтрование нефти,

е) тепловое напряжение топки 1500—2000 *т · кал/м³ч*.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К V ГЛАВЕ

1. Busley C. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktion, Wirkungsweise und Bedienung. Bd. I und Atlas. Kiel und Leipzig, 1901.
2. Bertin and Robertson. Marine boilers, their construction and working, dealing more especially with tubulous boilers. London 1898.
3. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie. T. 16, 1926.
4. Aufhäuser D. Brenstoffkritische Betrachtungen zum Ölfeuerung-und Ölmotor-Betrieb an Bord von Seeschiffen Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Стр. 106—123, 1926.
5. Dietrich Max. Der moderne Dampfkessel der Kriegs- und Handelschiffe. Rostock, 1908.
6. Fischer L. Oil imperialism. New-York, 1926.
7. Girard J. B. Chaudières marines. Paris, 1897.
8. Hutton W. S. Steam-boiler construction. London, 1898.
9. Ledieu. Les nouvelles machines marines. Supplément au traité des appareils à vapeur de navigation, mis en harmonie avec la théorie mécanique de la chaleur. T. III, Paris, 1882.
10. Lew J. Die Feuerung mit flüssigen Brennstoffen. 2. Aufl. Leipzig, 1925.
11. Müller P. Oelfeuerungsanlagen auf Dampfern der Hamburg-Südamerikanischen Dampfschiffarts-Gesellschaft. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 172—235, Berlin, 1923.
12. Müller. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktionsprinzipien, Anordnung und Bedienung. Braunschweig, 1908.
13. Oelfeuerungstechnik. 2. Aufl. Berlin, 1921.
14. Schulz. Die Oelfeuerung. Halle, 1925.
15. Sussman. Oelfeuerung für Lokomotiven. Berlin, 1912.

Журнальная литература

1. Annales de chimie et de la physique, T. XV, стр. 30, 1868.
2. Brenstoff und Wärmewirtschaft, стр. 10, 1924; № 7, 1925.
3. Dingler Polyt Journal. Стр. 28—91, 1869; 1867, стр. 111, 184 т.; 1868, т. 187 стр. 211, 213; 1878, т. 228, стр. 90; 1868, т. 189, стр. 61; 1887, т. 264, стр. 612.
4. Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie, T. 16, 1926.
5. Gander J. S. Oil-Burning with Scoc Mar. Boilers, Shipbld. and Mar. Eng. Bldr. V. 39, n 262 and 268. Mar 1932. p. 149—150. Aug. p. 410, 411.
6. Le Yacht, 25/II 1893.
7. Comptes Rendues, T. 68, стр. 325—53; т. 69, стр. 933.
8. Proceedings of the institution of civil engineers. Стр. 177, 1877—1878.
9. Repertory of arts. V. 3, p. 121.
10. Stowell's Petroleum Reporter. № 4, 1879.
11. Schiffbau. T. 26, стр. 755, 1925.
12. Times. 12/XII 1864; 4/I 1865.
13. Chemical News, Стр. 48, 1868.
14. VDI. Стр. 431, 1865, стр. 137; 1926; стр. 889—895; 1014—1019, 1037—1044, 1069—1071, 1089—1095, 1109—1116, 1887.
15. Wagner's Jahresbericht. Стр. 1313, 1885.

Английские патенты

№ 775, 1854 г.; № 2058. 591, 1856 г.; № 1989, 3465, 24, 21, 1862 г.; № 3195, 1105, 13, 1863 г.; № 263, 510, 871, 1131, 1864 г.; № 1928, 2661, 1865 г.; № 2196. 1867 г.; № 510, 1869 г.; № 1448, 1874 г.; № 1380, 1875 г.; № 4723, 1882 г.; № 4723, 1888 г.; № 2132, 1853 г.

16. Dingler Polyt. Journal, 184, стр. 111. 1867. т. Ueber Dampfkessel; Beheizung mit Petroleum.
17. Dingler Polyt. Journ. T. 264, стр. 612, 1887. Drory's Teer- und Oelzerstauber für Feuerung.
18. „Морской сборник", № 1, стр. 105—109, 1892. Нефтяное отопление системы Феррара.

19. Морской сборник, № 2, стр. 37, 1865. Нефть как топливо для паровых судов.

20. Морской сборник, № 4, стр. 34—46, 1865. Петролеум или нефть как топливо для паровых судов взамен каменного угля.

21. Морской сборник, № 7, стр. 40—44, 1867. Новое топливо для паровых судов.

22. Морской сборник, № 8, стр. 17 — 21, 1871. Аппарат горного инженера Нарецкого для отопления нефтью паровых котлов на судах.

23. Морской сборник, № 8, стр. 21 — 23, 1871. По вопросу о возгорании нефти.

Русская литература к V главе

1. Винтер В. Описание механизмов эсминца Новик. Кронштадт, 1914.

2. Военные флоты и морская справочная книжка. Стр. 933—37, стр. 1049—1056, 1897; стр. 48 — 57, 1901; стр. 63 — 92, 1904; стр. 108—109, 1906.

3. Гулишимбаров Ст. Нефтяное отопление пароходов и паровозов. СПБ, 1883.

4. Голов Д. Усовершенствования в судовых механизмах. СПБ, 1898.

5. Вагранов В. А. и Григорьян Г. М. Приборы для сжигания жидкого топлива. Ч. I. Москва-Ленинград, 1928.

6. Григорьян Г. М. Рациональное сжигание жидкого топлива под паровыми котлами. М.-Л., 1931.

7. Гусев С. В. Судовые паровые котлы. Ленинград, 1934.

8. Деркаченко Н. Судовые водотрубные котлы. Кронштадт, 1915.

9. Делези Ф. Нефть. Перев. с франц. И. Маркельс и Х. Рыт с приложением статьи А. Султан-Заде. Мировая нефтяная промышленность. Изд. Новая Москва, 1923.

10. Депп Г. Ф. Паровые котлы. Лекции, читанные в Технологическом институте. СПБ, 1908.

11. Ильютевич. Доклад, прочитанный 20/II 1916 в Императорском обществе судоходства инж.-мех. СПБ, 1911.

12. Корницкий С. Я. Работа с нефтяными топками. М.-Л., 1930.

13. Сурвилло В. А. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы. М.-Л., 1931.

14. Стромейер. Морские паровые котлы. Перев. с англ. и дополнил Голов-Д. СПБ, 1895.

Русские газеты и журналы

Морской сборник, № 8, стр. 22—23, 1871; №4, стр. 37, 1865; № 7, 1891; № 2, стр. 38, № 4, стр. 33, 1865; № 8, стр. 5, № 7, стр. 42, 1867; № 10, стр. 131—133, 1868; № 1, стр. 105, 1892.

Голос, № 228, 1880.

Бакинские известия. № 37, 1881; № 19, 1882; № 50, 1881; № 46, 1882.

Журнал мануфактур и торговли, 1864.

Немецкие патенты

1878 г. № 6475; 1879 г. № 8376; 1880 г. № 15207; 1881 г., № 17816; 1883 г., № 28017; 25942; 1886 г. № 39607, 38921, 36826; 1887 г. № 43815; 1884 г. № 30269, 29611; 1896 г. № 93485; 1898 г. 111965; 1903 г. № 165618; 1901 г. № 158492, 371896, 286672, 291029.

Английские патенты

1853 г. № 2132; 1854 г. № 775; 1856 г. № 2058, 591; 1862 г. № 1989, 3465, 24, 21 1863 г. № 3195, 1105, 13; 1864 г. № 263, 510, 871, 1131; 1865 г. № 1928, 2661; 1867 г. № 2196; 1869 г. № 540; 1874 г. № 1448; 1875 г. № 1380; 1882 г. № 4723; 1888 г. № 4723.

ГЛАВА VI

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ КОТЛОВ В НАЧАЛЕ XX В.

171. Общие тенденции в развитии судовых котлов начала XX в.

Подготовка капиталистических стран к империалистическим войнам резко обострилась в начале XX в. Морские флоты быстро увеличивались количественно и качественно. Военные суда переводились на нефтяное отопление. Длительные эксплоатационные и опытные наблюдения над сжиганием нефти под судовыми котлами позволили выработать рациональные принципы конструирования нефтяных топок в начале 90-х гг.

К 1910 г. практика опровергла существовавшее ранее мнение, что нефть можно сжигать лишь в топках цилиндрических и локомотивных котлов, что судовые водотрубные котлы неприспособлены к нефтяному отоплению, что для него надо дать совершенно новую конструкцию водотрубных котлов. К этому времени практика показала нежизненность многих систем водотрубных котлов[1]. Выходили из употребления те котлы, которые не удовлетворяли новым требованиям, а именно не давали возможности: 1) перевода на нефтяное отопление, 2) повышения давления пара в котле и 3) увеличения форсировки работы котлов.

При постройке судовых паровых котлов в начале XX в. особое внимание уделялось выбору диаметра кипятильных трубок. Ранее в вопросе выбора диаметра кипятильных трубок определенного мнения не было. Одни котлостроительные заводы предпочитали применять для постройки судовых паровых котлов мелкокалиберные трубки (котлы Торникрофта, Ярроу, Нормана), другие заводы, наоборот, считали более выгодным применять крупнокалиберные трубки (котлы Бельвиля, Никлосса, Дюрра и другие).

Стремление достигнуть дальнейшего уменьшения веса котла побудило ряд котлостроительных заводов отказаться от применения крупнокалиберных трубок, так как вес последних, при прочих равных условиях, прямо пропорционален их диаметру. Это видно из нижеследующей формулы веса 1 $м^2$ поверхностей нагрева:

$$\frac{G}{H_к} = \delta\gamma\frac{\gamma d}{2}\left(\sqrt{\frac{k_z+0{,}4P}{k_z+1{,}3P}}-1\right) кг/м^2.$$

[1] Известия по механической части флота. Вып. V, ч. II, СПБ, 1913; Голов. Паровые котлы современных военных судов. Стр. 99—138.

Здесь δ — толщина стенок цельнотянутой железной или стальной трубы в *см*; по формуле Баха

$$\delta = \frac{d}{2}\left(\sqrt{\frac{k_z + 0{,}4P}{k_z + 1{,}3P}} - 1\right) см,$$

$k_z = 1800$ *кг/см*^{2} — допустимое напряжение на растяжение для стали,
P — рабочее давление в атмосферах,
d — диаметр трубы в свету в *см*.

Более решительный переход к применению мелкокалиберных трубок в судовых котлах наметился лишь с начала XX в., когда появились в свет замечательные научные работы по теплопередаче[1]. Последние показали, что с уменьшением диаметра трубок значительно возрастали коэфициенты теплопередачи как при продольном, так и при перпендикулярном смывании газами котельных трубок. Увеличение коэфициента теплопередачи влекло за собой и повышение паропроизводительности поверхностей нагрева.

Стремление к стандартизации отдельных элементов котлов побудило ряд великих морских держав оставить на своих военных судах лишь по одному, по два типа котлов.

Ниже мы рассмотрим несколько систем котлов, принятых в 1910—1918 гг. в качестве основных для военных судов.

ОСНОВНЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОДОТРУБНЫХ КОТЛОВ В 1900—1920 гг.

172. Английские котлы Ярроу

На рис. 258 показан котел Ярроу[2], приспособленный к смешанному (уголь + нефть) отоплению. Такие котлы были поставлены на чилийских линкорах «Almirante Lattore» и «Almirante Cochrane».

В котлах этого типа семь средних рядов кипятильных трубок ставились совершенно прямо, тогда как четыре задних и два передних ряда изгибались по небольшому радиусу. Благодаря этому достигалась большая свобода теплового расширения трубок.

---

[1] 1. Reynolds. On the extent and action of the heating surfaces of steam boilers. Proc. of the literature and phil. Soc. of Manchester, 14, p. 7, 1874.
2. Stanton T. E. On the passage of heat between metal surfaces and liquids in contact with them. Phil. Trans. of the Royal Soc., 190, p. 67, 1897.
3. Nusselt W. Die Wärmeübertragung an Wasser im Rohr. Zum Hundertjahrfeier d. T. H. Karlsruhe (Karlsruhe, C. F. Müller, 1925), S. 366—386.
4. Soennecken. Der Wärmeübergang von Rohrwanders an Strömen des Wasser. Forsch. Arb. Ingen., 108/109 (Berlin, J. Springer, 1911), S. 32—78.
5. Nusselt W. Forsch. Arb. Ingen. H. 89, S. 1—38. Berlin, Springer, 1910.
6. Nusselt W. Das Grundgesetz des Wärmeüberganges. Gesundheit . . . S. 477. 1915.
7. Wamsler F. Die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft. Forsch. Arb. Ingen., 98/99, 1911.
8. Nusselt W. Forsch. Arb. Ingen., 63/64 S. 26, 1909.
9. Kennely E., Wright C. A. von Bylevelt J. S. The convection of heat from small copper wires. Proc. of the Amer. inst. of electr. eng. p. 700—729, 28/II 1909.
10. Rietschel. Mitt. Prüfungsanst. f. Heiz- und Luftungseinr. der T-H. H. 3. Berlin, 1910.
11. Nusselt W. Die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Rohrlange. 12. VDI. 54, S. 1154—1158, 1910.

[2] Англ. пат. № 23351, 1911 г.; № 5448, 1912 г.; № 10233, 1910 г.; № 27558. 1913 г.

В английских котлах Ярроу для смешанного отопления наружный диаметр трубок был принят равным 44,4 *мм*, а толщина их стенок у пяти внутренних рядов равнялась 4,2 *мм* и у остальных рядов — 3 *мм*. В котлах Ярроу, приспособленных для нефтяного отопления, кипятильные трубки имели меньший диаметр. У двух внутренних рядов трубок диаметр был равен 44,4 или 38, или, наконец, 34,9 *мм*, а в остальных рядах диаметр трубок равнялся 28,6 *мм*. Применение трубок меньшего диаметра позволяло в трубных пучках одинакового размера разместить большую поверхность нагрева в сравнении с котлами, построенными из крупнокалиберных трубок.

Котлы смешанного и угольного отопления не допускали применения в них мелкокалиберных трубок, так как пучки, составленные из

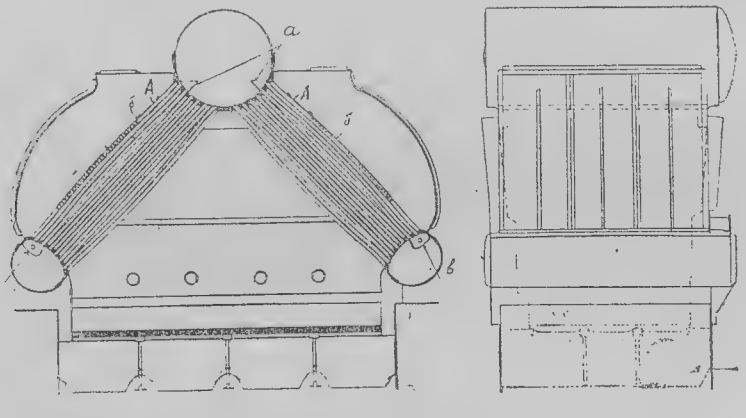


Рис. 258. Английский котел Ярроу смешанного отопления.

таких трубок, могли быстро заноситься золой, отчего понижалась паропроизводительность котлов. Если во время работы котла не производилась наружная обдувка труб, то не исключалась возможность вынужденной остановки котла для чистки труб от золы. В котлах нефтяного отопления эта опасность отсутствовала, так как в продуктах сгорания нефти золы почти не было.

Длина трубок обычно делалась равной 2,4—2,7 *м*, редко 3,6 *м*. Трубки располагались в шахматном порядке. В котлах смешанного отопления число рядов труб равнялось 13—14, а иногда снижалось до 9. В котлах Ярроу нефтяного отопления число рядов труб увеличивалось до 16—18. Большее число рядов труб в нефтяных котлах объяснялось тем, что они допускали большую нагрузку котла. По опытным данным, нагрузка котлов угольного отопления, определяемая весовым напряжением решетки $\frac{B}{R}$, обыкновенно не превышала 200 *кг/м²ч*, тогда как котлы нефтяного отопления выносили нагрузку в пересчете на $\frac{B}{R}$ до 400 *кг/м²ч*. При повышенной нагрузке росла и температура уходящих газов. По опытным данным котлостроительного завода (табл. 75), понижение паронапряжения поверхности нагрева $\frac{D}{H_к}$ с 78 до 14,65 *кг/м²ч* влекло за собой и уменьшение температуры уходящих газов с 400 до 250°.

Одновременно эти данные показывают, что за пятым рядом труб газы имели температуру 400° при $\frac{D}{H_к} = 14{,}65$ *кг/м²ч*, а при $\frac{D}{H_к} = 78$ *кг/м²ч* нагретые до 400° газы покидали уже восемнадцатый ряд труб. Во время испытаний давление пара поддерживалось равным 14 *ати*, стало быть, температура воды в котле была равной 194° Ц (табл. 84).

Таблица 84

Температура газов в °Ц									
Паронапряжен. пов. нагрева котла	В конце топки или перед первым рядом труб	За 1-м рядом труб	За 4-м рядом труб	За 5-м рядом труб	За 7-м рядом труб	За 10-м рядом труб	За 13-м рядом труб	За 16-м рядом труб	За 18-м рядом труб
$\frac{D}{H_к}$	T_I'	T_I''	T_{IV}	T_V	T_{VII}	T_X	T_{XIII}	T_{XVI}	T_{XVIII}
78	1250	1000	750	—	668	585	540	500	400
1465	845	600	230	400	368	325	310	283	245

Если число рядов труб невелико, из дымовой трубы котлов нефтяного отопления могут появляться языки пламени, что влечет за собой значительные тепловые потери с уходящими газами и представляет большие неудобства в тактическом отношении на военных судах.

Для более равномерного распределения газов по поверхности нагрева последние ряды труб прикрывались щитами *А* (рис. 258) приблизительно на ¼ длины трубы; просветы последнего ряда труб закрывались стальными угольниками *б*. Последние для удобства съема их при наружной чистке труб вешались на крючки. Число полос обыкновенно было в два раза меньше числа труб. Вследствие этого на участке расположения полос проходное сечение для газов уменьшалось в два раза, а сопротивление движению газов увеличивалось в четыре раза. Это вынуждало часть газов направляться в так называемые нижние мертвые углы. Невыгодной особенностью применения стальных полос являлась возможность заноса золой просветов задних рядов труб, что приводило к снижению паропроизводительности котла в особенности при угольном отоплении.

Кожух котла выполнялся из двух тонких стальных листов, между которыми прокладывались асбестовые листы толщиной в 9,6—12,7 *мм*. Это делалось для уменьшения потерь в окружающую среду. С этой же целью передние и задние стенки котла облицовывались огнеупорным кирпичом.

Паропроизводительность котлов Ярроу смешанного отопления определялась размерами колосниковой решетки. Для удобства обслуживания решетки заводы выполняли ее длиной не более 2,1 *м* и шириной 3,6 *м*. Очень редко ширину решетки увеличивали до 4,5 *м*. От размеров решетки зависели и габаритные размеры котла. Котлы угольного отопления имели длину не больше 2,1 *м*. Увеличение длины

котла за этот предел сделало бы необходимым и устройство решетки длиной более 2,1 *м*.

Обслужить такую решетку кочегары физически не могли, так как нельзя вручную достигнуть равномерного разбрасывания угля на участке решетки, отдаленном от топочных дверец более, чем на 2 *м*.

Совсем другое дело у котлов Ярроу нефтяного отопления (рис. 258а). Здесь длина и ширина котла ограничиваются не физическими способностями кочегаров, а конструкциями нефтяных форсунок. Последние в то время могли давать факел длиной до 4 *м*.

В начале XX в. в Германии для увеличения паропроизводительности нефтяных котлов их строили с двухсторонним отоплением. Форсунки устанавливались на переднем и заднем фронте котлов.

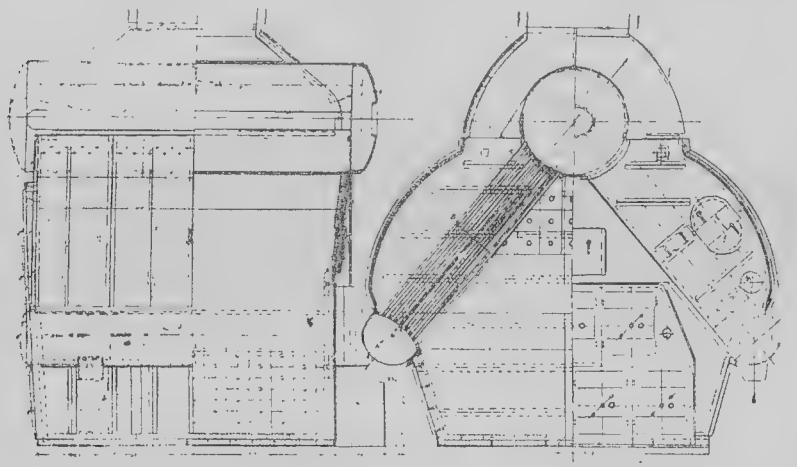


Рис. 258а. Английский котел Ярроу нефтяного отопления.

Преимуществом такого устройства топки, помимо увеличения производительности котла, является удлинение срока службы кирпичной обмуровки. Задняя стенка не подвергается действию факела, тогда как в котлах с односторонним отоплением задняя стенка от действия факела может быстро изнашиваться.

Габаритные размеры котлов, обусловливаемые родом топлива, определяли и поверхность нагрева отдельного котла. У котлов угольного и смешанного отопления наибольшая поверхность нагрева ($H_к$) составляла 465 $м^2$, тогда как у котлов с нефтяным отоплением максимальная поверхность нагрева достигала 840 $м^2$.

В данном котле обращает на себя внимание способ крепления крышек в коллекторах. В котлах Ярроу конца XIX в. крышки крепились к коллекторам снаружи и на шпильках. Во время работы котла значительно увеличивались напряжения в шпильках. Давление в котле отжимало крышку от коллектора и тем самым уменьшало плотность соединения в данных котлах. В котлах Ярроу постройки 1905—1915 гг. крышки крепились к коллектору изнутри его. Благодаря такому креплению крышка прижималась котельным давлением к коллектору, отчего плотность соединения увеличивалась. Вероятность появления течи при таком способе крепления шпилек была значительно меньше в сравнении с наружным креплением крышки в котлах Ярроу конца XIX в.

Для усиления циркуляции воды английские котлы Ярроу иногда снабжались четырьмя циркуляционными трубами диаметром в 100 *мм*. Устанавливались они вне кожуха с фронта котла по две трубы на водяной коллектор. Для облегчения теплового расширения кипятильных труб циркуляционные трубы несколько изгибались по дуге круга.

Начиная примерно с 1910 г., для миноносцев строили нефтяные котлы и без циркуляционных труб (рис. 258а). Это позволяло уменьшить длину коллекторов, а стало быть, и понизить вес котла. Получаемое ухудшение циркуляции воды при применяемых тогда форсировках было терпимо.

На полном ходу под котлами Ярроу можно было сжигать 4,9 *кг* нефти на 1 *м*² поверхности нагрева котла. Правильной регулировкой процесса горения удавалось устранять дымообразование. По данным завода Ярроу бездымность горения на судах достигалась и при $\frac{B}{H_к} = 6{,}1$ *кг/м²ч*, а при испытании котлов Ярроу на заводе бездымность горения получалась и при повышении $\frac{B}{H_к}$ до 7,35 *кг/м²ч*.

Возможная степень бездымного форсирования работы котла зависела также и от теплового напряжения топочного пространства $\frac{Q}{V_т}$. Заводы утверждают, что можно вести бездымный процесс горения при $\frac{Q}{V_т} = 1\,450\,000 - 1\,600\,000$ *кал/м³ч*.

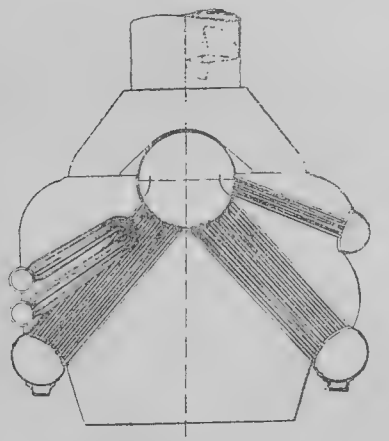


Рис. 259. Английский котел Ярроу с пароперегревателем и водяным экономайзером.

Введение в эксплоатацию судовых паровых турбин позволило снова вернуться к применению перегретого пара. Для осторожности перегрев пара допускали сначала только на 55°.

По опытным данным завода Ярроу, даже этот небольшой перегрев пара давал 10% экономии в расходе топлива. Пароперегреватель, как показано на рис. 259, располагался слева котла. Устройство пароперегревателя было весьма просто. Состоял он из двух небольших коллекторов и U-образного пучка труб. Пар из парового коллектора поступал в коллектор перегревателя, затем проходил пучок труб, перегреваясь по пути за счет теплоты газов. В перегретом состоянии пар уходил через второй коллектор в турбины.

По другую сторону котла располагался водяной экономайзер. Питательная вода поступала в водяной коллектор, а из него поднималась в паровой коллектор. Распределение поверхностей нагрева в котлах этого типа обычно бывало следующее: 1) поверхность нагрева котла 66%; 2) пароперегревателя 17%; 3) водяного экономайзера 17%.

Часовой съем пара с 1 *м*² поверхности нагрева можно было поддерживать равным 83 *кг*.

Основными преимуществами английских котлов Ярроу постройки 1908—1918 гг. в сравнении с котлами Ярроу конца XIX в. следует считать:

1) способность выдерживать повышение паронапряжения поверхности нагрева,
2) уменьшение диаметра кипятильных трубок с 44,4 до 28,6 *мм*,
3) снабжение котлов пароперегревателями,
4) увеличение к. п. д. котла,
5) внутреннее крепление крышек в коллекторах.

В 1904 г. котлы Ярроу наряду с котлами Бабкока и Вилькокса были приняты английским адмиралтейством в качестве основных типов котлов для больших военных судов. Вначале обе системы применялись приблизительно одинаково, но с 1908 г. котлы Ярроу получают более широкое распространение. В то время в английском флоте ими было снабжено около 70% линкоров и 85% миноносцев.

Котлы Ярроу признаны адмиралтейским типом и в японском флоте. Там они ставились как на миноносцах, так и на больших

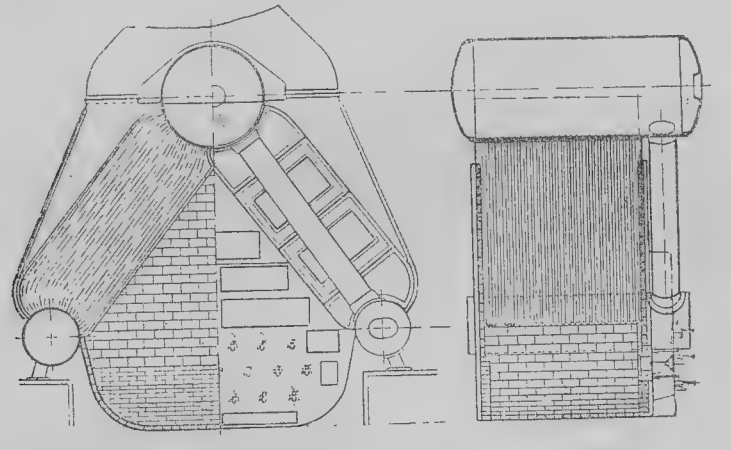


Рис. 260. Германский котел Ярроу.

судах вместо ранее принятых котлов Мийабара. В дальнейшем несколько видоизмененная конструкция котлов Ярроу устанавливалась на японских судах под названием котлов «Конзей».

Котлы Ярроу были поставлены на итальянские линкоры «Andrea Doria» и «Caio Duilio» (на которых ранее стояли котлы Бельвиля и Никлосса) и широко применялись в южных странах Америки, в Австрии, Голландии, Дании и Швеции. С некоторым опозданием котлы Ярроу начали применяться и в русском военном флоте.

173. Германские котлы Ярроу

На рис. 260 показан так называемый германский тип котлов Ярроу. Выгодной особенностью, отличающей его от английских котлов Ярроу, является применение цилиндрических коллекторов и перпендикулярный ввод кипятильных трубок в коллекторы.

Кипятильные трубки имели диаметр 36 *мм*, за исключением трубок, обращенных к топке. Диаметр последних колебался в пределах $\frac{d_н}{d_{вн}} =$ $= 45/41—48/44$ *мм*. Для защиты парового коллектора от действия пламени внутренние ряды трубок при входе в него перекрещивались.

Циркуляционные трубы у германских котлов Ярроу отличались большим диаметром. Их делали обыкновенно диаметром 200 *мм*, но

по одной с каждой стороны. Циркуляционные трубы выполнялись прямыми. Прямизна циркуляционных труб здесь не приносила особого вреда, потому что кипятильные трубки имели бо́льшую эластичность, чем в английских котлах Ярроу.

Водяные коллекторы в котлах Ярроу германские строители выполняли цельнотянутыми или цельновальцованными, а паровые коллекторы делались или сварными, или цельновальцованными. Германские котлы Ярроу имели почти такие же эксплоатационные характеристики, как и английские котлы.

174. Котлы Торникрофта

Котлы Торникрофта[1] (рис. 261) представляли почти точную копию германских котлов Ярроу и отличались от последних лишь тем, что внутренние ряды кипятильных трубок в них при входе в паровой

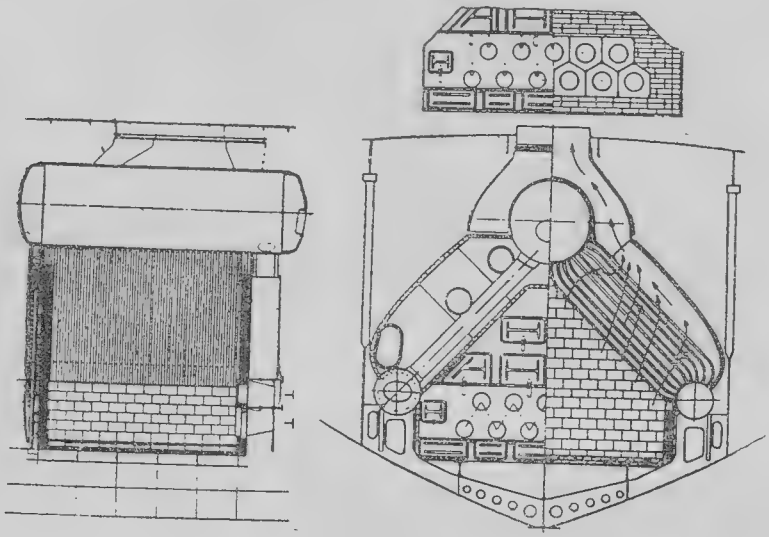


Рис. 261. Котел Торникрофта.

коллектор не перекрещивались. Все нижние концы трубок у торникрофтовских котлов загибались только по одному радиусу. В каждом трубном пучке было от 16 до 20 рядов труб.

По внешнему виду данные котлы похожи на первый тип котлов Торникрофта конца XIX в. Только топки в данной конструкции котлов Торникрофта нефтяные и более высокие, а кипятильные трубки сделаны длиннее. Нормальная длина трубок была принята заводом равной 2,75 *м*. Для повышения паропроизводительности котлов длину трубок увеличивали до 4,25 *м*. В котлах же старой конструкции длина трубок равнялась 1,6—2 *м*.

Благодаря указанным изменениям паронапряжение в новой конструкции котлов Торникрофта значительно увеличилось ($\frac{D}{H_к}$ достигало 70—80 *кг/м²*). Одновременно значительно уменьшился и вес котла на 1 *т* пара, так как увеличение поверхности нагрева в котле произведено за счет удлинения трубок — более легкой части котла.

[1] Англ. пат., № 21160, 1912 г.; № 16994, 1910 г.

Для нефтяных котлов завод рекомендовал диаметры кипятильных труб для двух внутренних рядов по 44,5 *мм*, а остальные по 35 *мм*.

Сравнительно экономичное горение под котлами Торникрофта, по данным завода, удавалось поддерживать при $\frac{Q}{V_т} = 1\,600\,000$—1 900 000 *кал/м³ч*. Процесс горения становился менее совершенным при тепловом напряжении топки $\frac{Q}{V_т} = 2\,250\,000$ *кал/м³ч*. Максимально длительная нагрузка котла определялась весовым напряжением поверхности нагрева $\frac{B}{H_к} = 5{,}33$ *кг/м²ч* нефти. Все остальные характеристики у котлов Торникрофта такие же, как и у английских котлов Ярроу.

Котлы Торникрофта применялись на миноносцах в Англии, Франции и США.

В Италии и Австрии торникрофтовские котлы кроме миноносцев ставились и на крейсерах.

175. Котлы системы Вулкан для эсминца «Новик»

На рис. 262 показан котел системы Вулкан с установленным внутри его котлом той же системы для греческого миноносца. По своему устройству котлы системы Вулкан[1] напоминали собой германские котлы Ярроу. Отличались они от последних тем, что циркуляционные трубки присоединялись в них к паровому коллектору через коробку, которая приклепывалась к фронтовому днищу. Такое присоединение циркуляционных труб не требовало удлинения парового коллектора и давало возможность уменьшить его вес. Другой отличительной особенностью котлов системы Вулкан являлся ввод питательной воды в водяные коллекторы. Согласно патенту завода, питательная вода вводилась в котел через патрубок, входя-

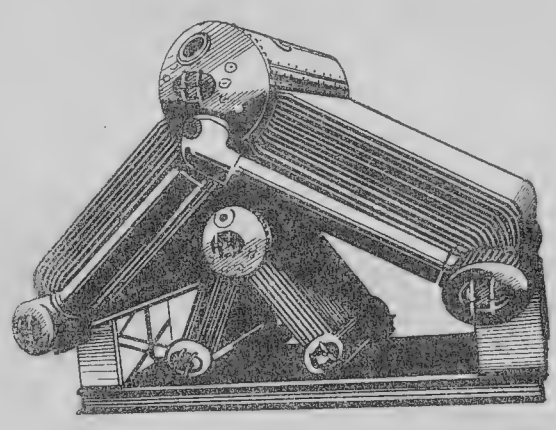


Рис. 262. Котел системы Вулкан.

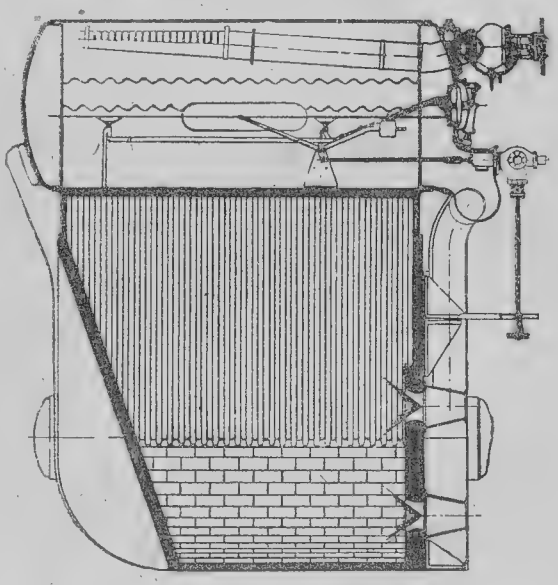


Рис. 263. Котел системы Вулкан.

[1] Англ. пат., № 9670, 1913 г.; Винтер В. Описание механизмов эскадренного миноносца «Новик». Кронштадт, 1914.

щий в коробку, соединяющую циркуляционные трубки с паровым коллектором (рис. 263). Из патрубка она опускалась в водяные коллекторы по двум трубам, проходящим внутри циркуляционных труб. Выйдя из последних, питательные трубы изгибались и тянулись вдоль всех водяных коллекторов против входных отверстий первых рядов труб. На этом участке питательные трубы снабжались рядом сопел, через которые в патрубки впрыскивалась вода.

Показанный на рис. 262 котел системы Вулкан построен в 1910 г. для русского эскадренного миноносца «Новик». Котел строился для нефтяного отопления. Он был снабжен 16 механическими форсунками Кертинга. В январе 1911 г. на заводе Вулкан было проведено испытание этого котла. Подробные характеристики приведены в табл. 85.

Таблица 85

Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов		
			1	2	3
Время испытания	—	—	28/I 1911	30/I 1911	30/I 1911
Продолжительность испыт.	Z	час	1	1,25	0,75
Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	730	730	730
Топливо (Teeröl) германское дегтярное масло	$Q_н^р$	*кал/кг*	9028	9028	9028
Удельный вес топлива	$\gamma_т$	*кг/дц*^{3}	1,07	1,07	1,07
Сожжено топлива в час	B	*кг/ч*	3360	2365	1280
Сожжено топлива в час на одну форсунку	$b_ф$	*кг/ч ф.*	210	261	256
Давление пара в котле	$P_л$	*ати*	17	17	17
Температ. питательной воды	$t_к'$	°Ц	12	2,5	2,5
Испарено воды в час	D	*кг/ч*	36000	27560	14600
Паронапряжение поверхности нагрева котла, полагая $\Delta i_п = 640$ *кал/кг*	$\frac{D_с}{H_к}$	*кг/м*^{2}*ч*	51	39,5	20,9
Стандартная испарительность топлива, полагая $\Delta i_п = 640$ *кал/кг*	$И_с$	*кг/кг*	11,0	12,2	12
К.п.д. котла	η	°Ц	76,4	86	84
Давление нефти перед форсункой	$(P_в)'_ф$	*ати*	6,1	8,83	8
Температура нефти перед форсункой	$(t_н)'_ф$	°Ц	121	124	123
Температура нефти в систерне	$(t_н)_с$	°Ц	30	57	43
Число работающих форсунок	$n_ф$	—	16	9	5
Температура воздуха в котельной	$t_в$	°Ц	24	20	30
Давление воздуха в котельной	$\Delta s_{к-й}$	*мм* вод. ст.	65	50	40
Число оборотов вентилятора	n	об/мин.	510	395	300
Температура газов в дымовой трубе	$(t_г)'_{д.\ тр}$	°Ц	350	300	240

Испытания котла проводились на немецком дегтярном масле (Teeröl); свойства и анализ топлива приведены в табл. 86 [1].

Таблица 86

	Обозначение	Размерность	Числовые величины
Удельный вес при 15°	γ	—	1,068
Точка вспышки в открытом тигле	t вспышки	°Ц	97
Точка воспламенения	t восплам.	°Ц	116
Состояние масла при — 8°	—	—	жидкое
» » » —15°	—	—	начало застывания
» » » —18°	—	—	мазеобразное
Состав топлива:			
Углерод на раб. массу	C^p	%	78,72
Сера	S^p	%	1,56
Кислород и азот	$(O+N)^p$	%	3,6
Зола	A^p	%	0,08
Вода	N^p	%	следы
Теплотворная способность на рабочую массу	$Q_н^p$	*кал/кг*	9028,2

Данные табл. 85 указывают на весьма высокое использование тепла в котле. Испарительность топлива на испытуемом котле была в 2—3 раза больше испарительности мазута, получаемой в 1901—1902 гг. на русских военных судах. Эти огромные достижения объясняются тем, что к 1910 г. судовые теплотехники достаточно хорошо изучили технику сжигания нефти.

Изучение условий, благоприятно влияющих на протекание процесса горения нефти (подогрев, испарение, вспышка, крекинг), позволило сконструировать прекрасные для того времени форсунки и топки (конфигурация топки, устройство кирпичной кладки, ввод воздуха в топку и т. д.).

Во время испытания были замерены изменения основных размеров котла от нагревания его частей. Наибольшие изменения этих размеров приведены в табл. 87.

Таблица 87

	Передний конец котла	Задний конец котла
Расстояние между нижними коллекторами увеличилось на	11 *мм*	15 *мм*
Расстояние между нижними и верхними коллекторами увеличилось на	5 »	7 »

[1] Винтер. Описание механизмов эск. миноносца «Новик». Кронштадт, 1914.

Измерение деформаций производилось особым стержнем с загнутыми и заостренными концами, которым отмечались вершины треугольника на трех коллекторах при холодном состоянии котла. Отмеченные вершины для большей ясности пробивались керном. Во время установившегося режима работы котла снова производили измерение расстояния между отмеченными вершинами.

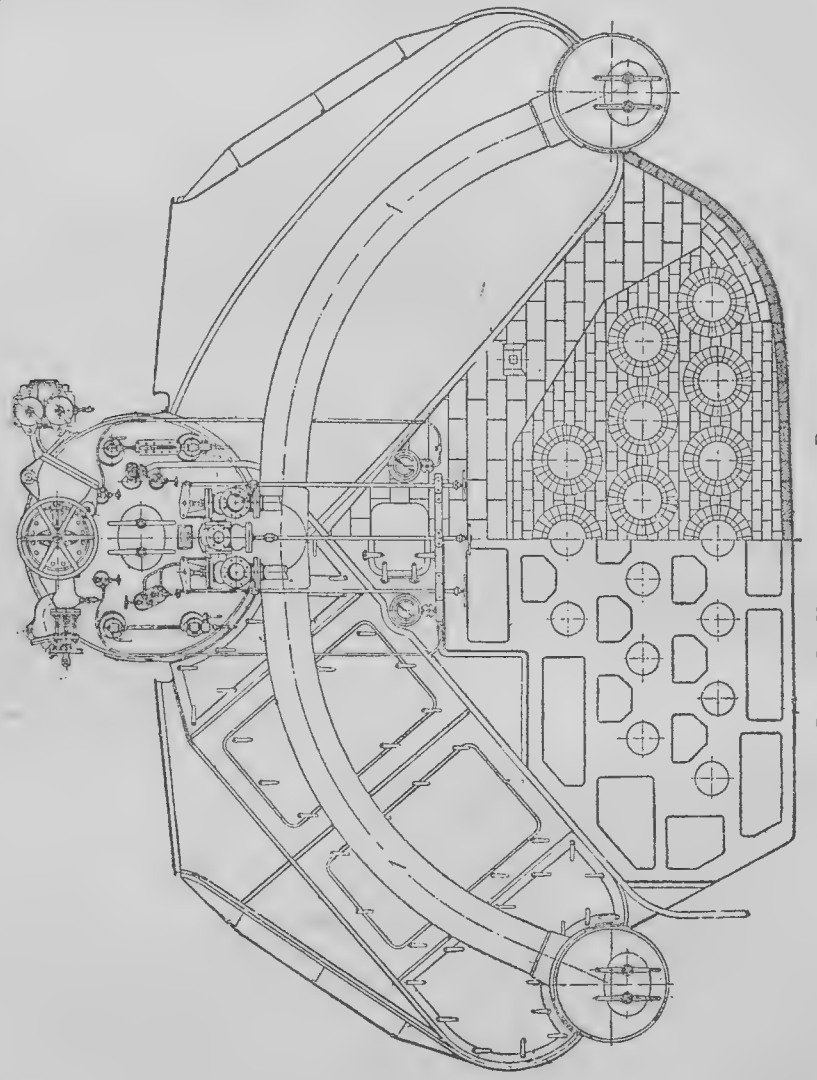


Рис. 264. Котел системы Вулкан.

При испытании миноносца «Новик» выяснилось, что он не мог длительно развивать полагающуюся по контракту скорость 36 узлов. Было решено увеличить поверхность нагрева котлов. Общая поверхность нагрева (табл. 88) была увеличена на 16%.

Увеличение поверхности нагрева было достигнуто путем повышения парового коллектора у всех котлов на 325 *мм*, а стало быть, и соответствующего удлинения кипятильных трубок. Также была увеличена длина малого котла на 213 *мм* и остальных пяти на 294 *мм*. Наряду с этим была уменьшена толщина трубных досок у малого котла с 56 до 52 *мм* и у остальных с 58 до 54 *мм*.

Таблица 88

	Поверхн. нагрева в котле		Суммарная поверхность нагрева	
	малый	большой	$м^2$	%
Котлы, первоначально поставленные на „Новик“	630	730	4280	100
Новые котлы системы Вулкан, поставленные на „Новик“	720	830	4970	116

Напряжения в трубных досках не должны были повыситься, так как одновременно были увеличены расстояния между осями трубок в продольном направлении. Низший уровень воды в котле также повысили на 80 *мм*, чтобы во время качки судна быть уверенным, что вода пойдет и в крайние ряды трубок.

Для устранения ранее наблюдавшейся течи в соединениях нижнего конца циркуляционных труб с водяным коллектором и для обеспечения более свободного теплового расширения частей котла циркуляционные трубы изгибались (рис. 264). Одновременно был уменьшен их диаметр с 320 до 240 *мм* у малого котла и с 350 до 270 *мм* у остальных котлов. Трубы питательной воды в новых коллекторах направлялись непосредственно в паровой коллектор, а не в циркуляционные трубы, как в ранее рассмотренных котлах.

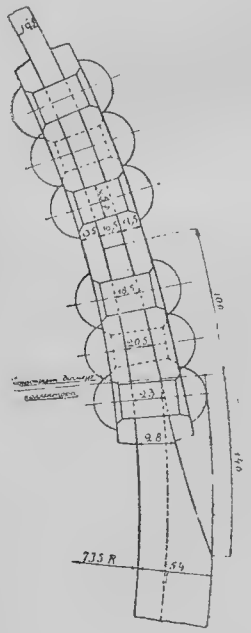


Рис. 265. Разрез шва коллектора.

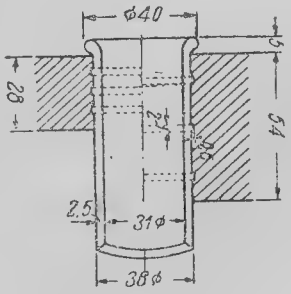


Рис. 266. Способ крепления кипятильных труб малого диаметра.

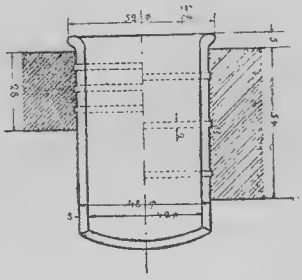


Рис. 266а. Способ крепления труб большого диаметра.

Большой интерес в этом котле представляют: 1) конструктивное выполнение коллекторов; 2) соединение кипятильных трубок с коллекторами и 3) устройство кожухов.

Водяные коллекторы в котлах системы Вулкан, как и у германских котлов Ярроу, сделаны цельнокованными. Паровой же коллектор имел два продольных шва, расположенных выше горизонта воды у малого котла на 220 *мм*, а у большого на 200 *мм*. На рис. 265 показан разрез шва у большого котла. Совершенно такие же швы и у парового кол-

лектора малого котла. В табл. 89 приведены основные размеры швов у малого и у больших котлов.

Таблица 89

	Размерность	Большой котел	Малый котел
Толщина трубной доски постепенно сведена	*мм*	от 54 до 16,5	от 52 до 16
Толщина накладок	„	13,5	13,0
Ширина накладок	„	303	303
Диаметр заклепок	„	25	25
Шаг заклепок	„	154	156
Число рядов заклепок	„	6	6

На рис. 266 показан способ крепления кипятильных трубок диаметром в 36 *мм*. Правая часть рис. 266 показывает крепление трубок в паровом коллекторе, а левая — в водяном; рис. 266а показывает,

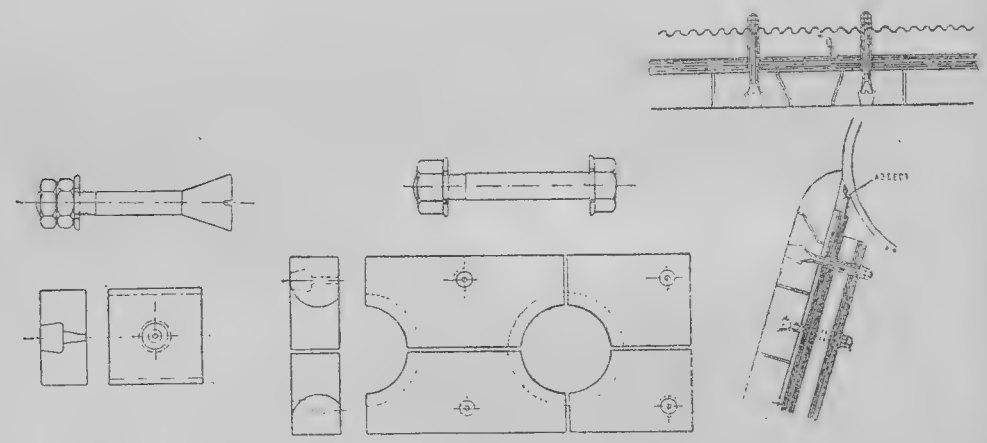


Рис. 267. Огнеупорные кирпичи и крепительные болты.

Рис. 267а. Схемы крепления огнеупорных кирпичей.

как крепятся в коллекторах трубки большого диаметра (28 *мм*). Для большей крепости соединения в отверстиях трубных досок сделаны кольцевые канавки, которые заполняются металлом трубок при их развальцовке; выступающие в коллектор концы труб раздавались колокольчиком (рис. 266а). Как малый, так и большой котлы имели по 22 ряда труб в каждом пучке. Остальные данные о кипятильных трубках приведены в табл. 90. Задняя стенка топки имеет носообразную форму. Такая форма задней стенки выгодна тем, что она облегчает крепление кирпичей в кожухе. Носообразная форма задней стенки принесла с собой и новый недостаток: выступающая в топку часть задней стенки, находясь под ударами факела, быстро разрушалась и требовала поэтому более частого ремонта.

С внутренней стороны как задняя, так и все остальные стенки топки защищены огнеупорным кирпичом, который крепится к кожуху

специальными болтами (рис. 267 и 267а). Головки болтов для защиты от действия высокой температуры газов входят глубоко в отверстия кирпичей и замазываются огнеупорной глиной. После закрепления кирпичей все стенки облицовываются огнеупорной глиной. Фронтовая стенка топки имеет 16 отверстий для форсунок Кертинга. Средняя часть передней стенки выполнена из листовой стали толщиной в 4 *мм*. В районе нефтяных форсунок эта стенка имеет коробчатую форму. Высота коробки равна 2200 *мм*, а ширина — 380 *мм*. Передние стенки этой коробки имеют толщину 1,5 *мм*. Устройство передней стенки топки со всей гарнитурой показано на рис. 264. Остальная часть фронта котла, боковые стенки и вертикальная часть задней стенки покрыты с внутренней стороны слоем асбеста в 10 *мм*, который крепится к стальным листам толщиной в 1 *мм*. Затем идет воздушная изоляция в 6 *мм* и снова стальные листы толщиной в 1,5 *мм*.

Передняя и задняя части кожуха, расположенные против кипятильных труб, снабжены дверцами, через которые возможно производить осмотр и очистку труб.

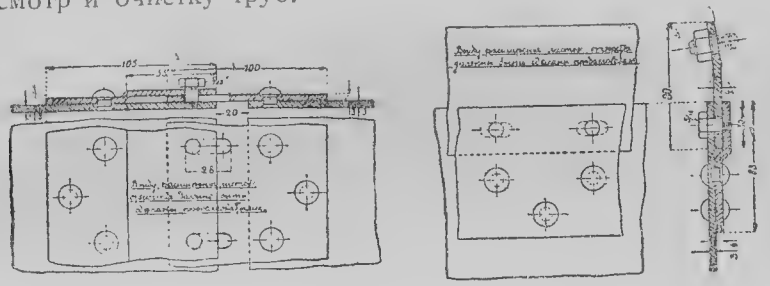


Рис. 268 и 269. Способ крепления пода топки.

Носообразная задняя стенка (рис. 263) покрыта под кирпичом слоем асбеста в 8 *мм* толщиной. Далее идет листовая сталь толщиной в 3 *мм*, а потом воздушная прослойка в 75 *мм*, и снова листы стали толщиной в 1,5 *мм*. Для усиления жесткости конструкции задней стенки поставлено восемь рядов угольников. Днище топки защищено от действия пламени рядом огнеупорных кирпичей нормальных размеров. Кирпичи как здесь, так и на других стенках укладываются с просветами, замазываемыми огнеупорной глиной. Это дает им возможность свободно расширяться. Днище под кирпичами имеет слой асбеста толщиной в 6 *мм*, который лежит на стальном листе в 3 *мм* толщиной. Для свободного расширения от нагревания днище имеет два подвижных соединения. Одно из них дает возможность расширяться днищу в длину и другое в ширину. На рис. 268 показано устройство этого соединения. Рис. 269 дает соединение днища с коллекторами.

Суммарная поверхность нагрева котлов эсминца «Новик» составляла 4970 $м^2$. Основные характеристики котлов «Новика» приведены в табл. 90.

На полном ходу главные и вспомогательные механизмы котла развивали мощность 45 000 *и. л. с.*, при этом сжигалось 28 *т* мазута в час. $Q^р_н = 9535$ *кал/кг* или 26,6 *т* условного мазута $Q^р_н = 10\,000$ *кал/кг*.

На лошадиную силу-час расходовалось мазута 0,592 *кг/и. л. с. ч*, а на 1 $м^2$ поверхности нагрева расходовалось 5,35 *кг/м²ч* мазута.

Если предположить, что испарительность топлива была равной 11, как в опыте № 1 табл. 85, то суммарная паропроизводительность котлов получится равной 308 *т/ч*.

Таблица 90

	Размерность	Малый котел	Большой котел
Давление пара	*ати*	17	17
Поверхность нагрева котла	$м^2$	720	830
Объем парового пространства	$м^3$	3,21	3,63
Объем водяного пространства	„	10,72	11,95
Рабочий уровень воды ниже центра парового коллектора	*мм*	80	100
Диаметр парового коллектора	„	1420	1470
Диаметр водяного коллектора	„	700	700
Длина цилиндрической части парового коллектора	„	3305	3386
Длина цилиндрической части водяного коллектора	„	3360	3577
Толщина стенок парового коллектора	„	16	16,5
Толщина стенок водяного коллектора	„	15,0	15,0
Толщина трубной доски парового коллектора	„	52	54
Толщина трубной доски водяного коллектора	„	28	28
Толщина стенок заднего днища парового коллектора	„	18,5	19
Толщина стенок переднего днища парового коллектора	„	19,5	20
Толщина стенок днищ водяного коллектора	„	15	15
Расстояние между центрами водяных коллекторов	„	4340	5600
Вертикальное расстояние между центрами водяного и парового коллекторов	„	2950	2925
Наружный диаметр двух рядов труб, обращенных к факелу	„	48	48
Наружный диаметр двух остальных труб, обращенных к факелу	„	36	36
Толщина стенок двух рядов труб, обращенных к факелу	„	3,0	3,0
Толщина стенок двух остальных труб, обращенных к факелу	„	2,5	2,5
Число трубок	шт.	2288	2356
Внутренний диаметр циркуляционных труб	*мм*	240	270
Толщина стенки циркуляционных труб	„	9	10
Число нефтяных форсунок	шт.	13	16
Диаметр отверстий сопла форсунок	*мм*	2,5	2,5
Диаметр воздушного сопла входной	„	275	275
Диаметр воздушного сопла в свету	„	240	240
Диаметр воздушного сопла выходной	„	340	340
Вес шести котлов с изоляцией, кожухом, кладкой, без арматуры, задвижек и форсунок с общей пов. нагрева 4280	*т*	175	—
Мелкая арматура, внутренние трубы, все крепления и приводы к частям арматуры	„	10,6	—
Дымоходы и дымовые трубы полностью	4 шт.	16 *т* весом	—
Нефтяные устройства, каждый комплект, состоящий из двух нефтяных насосов подогрева нефти, двух фильтров, кранов, воздушных задвижек, форсунок и пр.	3 компл.	15,4 *т* „	—
Три главных и вспомогательных донки	6 шт.	10,2 *т* „	—
Подогреватели питательной воды	3 шт.	4,6 *т* „	—
Вентиляторы	6 шт.	6,6 *т* „	—
Вес всей установки на 1 *т* пара	*т/т*	1,04	—
Вода в котлах горячая	—	52,2 *т*	—
Перегрузка от замены котлов новыми и вследствие попутно вызванных переделок	—	36,0 *т*	—
	—	326,6 *т*	—

При заданном условии паронапряжение поверхности нагрева будет равно $\frac{D}{H_к} = \frac{308\,000}{4\,970} = 62$ *кг/м²ч*.

Вес котельной установки с водой на 1 *т* производимого пара равняется $\frac{G_{к.у}}{D} = \frac{326{,}6}{308} = -1{,}06$ *кг/кг*.

Вес котельной установки без воды $\frac{274{,}6}{308} = 0{,}89$ *кг/кг*.

Испытания эсминца «Новик» показали отличную работу котлов и механизмов.

176. Котлы Уайта — Форстера

Котлы Уайта — Форстера (рис. 270) напоминали собой английские котлы Ярроу. Отличались они от последних специальной формой

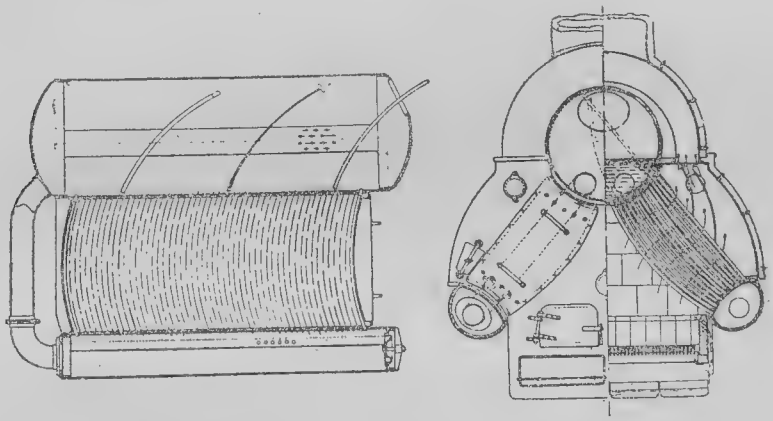


Рис. 270. Котлы Уайт—Фостера.

изгиба кипятильных трубок, позволяющей производить замену их через паровой коллектор. Верхний коллектор делался относительно большим. Для усиления циркуляции воды рассматриваемые котлы снабжались двумя циркуляционными трубами большого диаметра. Котлы же Уайта — Форстера конца XIX в. снабжались лишь одной молотообразной циркуляционной трубой.

Основными недостатками котлов Уайта — Форстера постройки конца XIX в. были: 1) неравномерное обогревание газами кипятильных трубок и 2) сравнительно большая жесткость конструкций котла, обусловленная наличием молотообразной циркуляционной трубы, соединяющей паровой и водяной коллекторы.

В начале XX в. в котле Уайта — Форстера был сделан ряд усовершенствований, направленных на устранение указанных недостатков. Для достижения более равномерного омывания газами трубок по всей их длине над пучками труб с каждой стороны котла ставилось по два железных щитка. Установка щитков создавала три камеры для выхода по ним газов. Выходные отверстия камер подбирались такого сечения, которое могло обеспечить омывание трубок газами с одинаковыми скоростями по всей длине трубок. Выходные щели камер, расположенных ближе к коллектору, делались уже. Газы, встречая здесь большее сопротивление своему движению, частично отклонялись к нижним частям трубок и уходили в дымоход по наружным

выходным камерам. Это мероприятие дало заметное улучшение в распределении газов по длине трубок. Его применяют в котлах нефтяного отопления и в наши дни (котлы Джонсона).

Обогревание нижних частей кипятильных трубок усилилось. Однако, это улучшение наблюдалось лишь при отоплении котла углем с весьма малым содержанием золы. При употреблении же угля с повышенным содержанием золы узкие выходные щели быстро забивались золой, а вслед за ними забивались золой и верхние части кипятильных трубок. В результате поверхность нагрева, омываемая газами, могла сокращаться более, чем в два раза, что влекло за собой понижение паропроизводительности котла также приблизительно в два раза.

Начиная примерно с 1912 г., для облегчения теплового расширения кипятильных трубок, циркуляционные трубы ставились не прямыми, а несколько изогнутыми. Число их было увеличено до четырех (по две на каждый водяной коллектор), а диаметр уменьшен вдвое. Диаметр кипятильных трубок принят заводом для внутренних рядов 28,5 *мм*, а для остальных 25,4 *мм*. Длину котлов, определяемую расстоянием между осями крайних рядов трубок, иногда доводили до 4,6 *м*.

Котлы Уайта — Форстера ставились на миноносцы Италии и южноамериканских стран. Особенно большое распространение эти котлы получили в США. Даже в настоящее время котлы Уайта поставлены более, чем на 30 судах военного флота США с общей мощностью примерно в 2 000 000 *л. с.*

177. Котлы Мошера

Котлы Мошера (рис. 271) по внешнему виду также сходны с английскими котлами Ярроу. Отличаются они от последних возможностью производить замену кипятильных труб через специальные горловины в паровом коллекторе. Для этой цели все трубки изгибаются так, чтобы любую трубку можно было вынуть через ряд горловин, расположенных против каждого пучка труб. Горловины закрываются пробками с коническими головками (рис. 272). Для большей плотности соединения под головки ставится прокладка из медной трубки.

В конце газохода устанавливался кирпичный щит *А* с отверстиями для прохода газов (рис. 271). Предполагалось, что производимое щитом затормаживание движения газов увеличит время соприкосновения их с поверхностями котла и тем самым повысит теплопередачу.

Как показывают опытные наблюдения, теплопередача к трубкам котла зависит от диаметра трубок, от их расположения (шахматное или в затылок), от направления газов по отношению к осям трубок (продольное или поперечное), от температуры газов и воды в котле, от числа рядов трубок в газоходах и от скорости газов в них. Все упомянутые величины не изменяются от создания в конце газохода местного сопротивления движению газов. Наоборот, установка щита приносит только вред. Для преодоления вызываемых им сопротивлений необходимо было предусмотреть увеличение мощности дутьевых вентиляторов. Щит требовал увеличения расхода пара на собственные нужды (дутьевые вентиляторы), а также мог заноситься золой, что приводило к падению паропроизводительности котла.

Выгодной особенностью рассматриваемого котла является расположение и устройство труб питательной воды в паровом коллекторе.

Как видно из рис. 271, питательные трубы расположены в паровом коллекторе против крайних рядов кипятильных трубок. Наружные концы питательных трубок закупорены, но зато трубки с нижней стороны имеют отверстия диаметром 4,75 *мм*, расположенные против каждой кипятильной трубки наружных рядов. Струи воды, выходящие из питательной трубы, попадают прямо в крайние ряды трубок. Такая организация питания котла имеет двоякую выгоду: во-первых, усиление естественной циркуляции воды в котле, во-вторых, увеличение разницы температуры газов и питательной воды влечет за собой увеличение тепловосприятия последних рядов труб. Наконец, направление питательной воды в задние ряды кипятильных труб понижает температуру уходящих газов, отчего повышается к. п. д. котла.

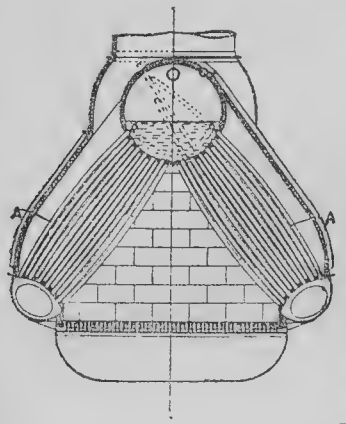


Рис. 271. Котлы системы Мошера.

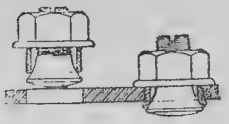


Рис. 272. Пробки для закрытия горловинок в котле Мошера.

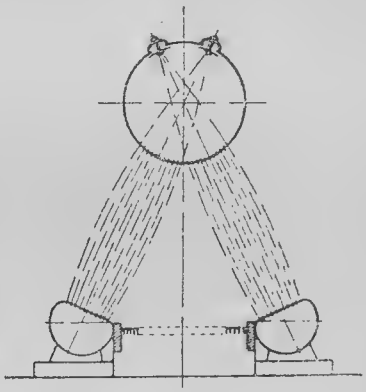


Рис. 273. Котел Блекиндена.

Таким образом основными изменениями в котле Мошера начала XX в. в сравнении с его котлами 90-х гг. XIX в. можно считать:

1) треугольную форму котла,

2) устройство одного ряда горловин для каждого пучка трубок вместо пяти в прежних котлах,

3) применение слегка изогнутых трубок,

4) устройство в конце газохода решетки, служащей для равномерного распределения газов по длине трубок.

Котлы Мошера строились для угольного и для нефтяного отопления. Ставились они на миноносцы и на большие военные суда. Котлы Мошера сохранились до настоящего времени.

178. Котлы Блекиндена

Котлы Блекиндена (рис. 273) представляют собой почти точную копию котлов Мошера. Отличаются они от последних отсутствием в конце газохода щита. Питательная вода поступает в паровой коллектор по одной трубе.

Важным усовершенствованием данных котлов в сравнении с котлами Блекиндена образца 1893 г. является отказ от крестообразного ввода в паровой коллектор первых рядов кипятильных трубок. Это мероприятие позволяет производить механическую очистку от накипи наиболее нуждающихся в производстве очистки первых рядов кипятильных трубок. Крестообразная же форма ввода первых рядов кипя-

тильных труб в коллекторы в том виде, в каком она применялась Блекинденом в конце XIX в., не позволяла производить очистку труб от накипи.

Данные котлы в начале 900-х гг. ставились в Англии на миноносцы и легкие крейсера, а начиная с 1910 г., их продолжали ставить лишь в итальянском флоте, где ими снабжали даже линкоры.

179. Котлы германского адмиралтейства

В начале XX в., после длительных испытаний различных систем водотрубных котлов, германское адмиралтейство выбрало основным типом котлов для всех боевых судов, начиная с линкора и кончая миноносцем, котлы Торникрофта — Шульца. В котлы этой системы были введены различные детальные изменения и усовершенствования. Таким путем выработался тип котлов германского адмиралтейства.

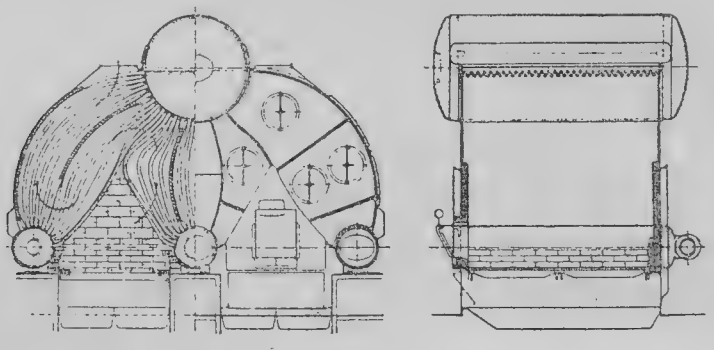


Рис. 274. Котлы германского адмиралтейства.

Выбор одного типа котлов был вызван рядом очень важных причин. Основные из них: возможность хорошо обучить кадры по управлению и уходу только за одним типом котлов. Кадры можно перебрасывать с одного корабля на другой без затраты времени на их обучение на новом корабле.

При условии распространения в одном государстве одной или двух систем котлов возможно произвести быстрый ремонт их в любом порту. Последние снабжаются в достаточном количестве нужными запасными частями для одной или двух систем котлов. Это подтвердил опыт мировой войны. Замена трубок на сожженном котле Торникрофта в германском военном флоте была произведена силами порта в течение лишь трех дней.

Такой же ремонт на французском военном корабле производился примерно в течение месяца, так как в одном порту не было нужных запасных частей, а во втором порту запасные части были, но не было кадров, умевших хорошо произвести ремонт котла, так что пришлось затребовать рабочих из другого порта.

Устройство котла германского адмиралтейства видно из рис. 274 (стрелки показывают путь газов). Направление движения газов здесь обеспечивается устройством трубных перегородок, показанных на чертеже штрихами. Изменения температуры в отдельных точках газохода показаны на рис. 274а.

Для усиления циркуляции воды вместо циркуляционных труб[1] служили четыре ряда труб, которые в среднем пучке были защищены от действия теплоты газов двумя трубными перегородками. Вода из парового коллектора спускалась по четырем упомянутым рядам труб в средний водяной коллектор, из него частично подымалась по трубкам среднего пучка, обогреваемого газами, а частично переходила в боковые водяные коллекторы через трубу большого диаметра, соединяющую все три водяные коллекторы. Последние делались цельнотянутыми с диаметром не меньше 0,4 *м*. По данным завода, диаметр паровых коллекторов колебался в пределах 1,1—1,4 *м*. Все кипятильные трубки имели одинаковый наружный диаметр в 36 *мм*. Толщина же стенок у двух внутренних рядов трубок была принята заводом в 3,5 *мм*, тогда как у остальных рядов трубок она равнялась только 3 *мм*. Продольное расстояние между осями трубок было взято в 72 *мм*, что позволяло составлять из трубок газонепроницаемые перегородки.

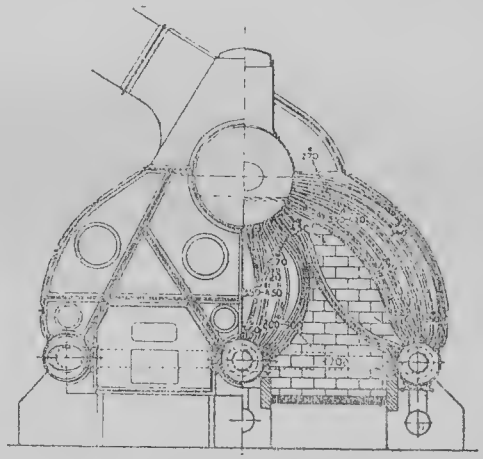


Рис. 274а. Температура и путь газов в котле германского адмиралтейства.

Котлы германского адмиралтейства работали довольно экономично даже при очень сильных форсировках. По опытным данным, температура уходящих газов в них колебалась от 250 до 340°. Нормальное весовое напряжение решетки в котлах этого типа поддерживалось равным $\frac{B}{R} = 200$ *кг/м²ч*. Раньше (в 1910—1913 гг.) эти котлы строились исключительно для угольного отопления. Лишь во время империалистической войны (1914—1918 гг.) и позже котлы германского адмиралтейства начали приспосабливать и под нефтяное отопление.

180. Котлы Нормана

На рис. 275 показан один из котлов Нормана[2], строившихся для судов военного флота. Путь газов в пучке труб в данном котле отмечен стрелками на рис. 275. Здесь же показаны трубные перегородки, направляющие движение газов в пучке труб. Для более полного омывания поверхности нагрева устанавливался щит *H*, отклоняющий движение газов несколько вниз. Максимально длительная нагрузка в котлах Нормана определялась $\frac{B}{R} = 220$ *кг/м²ч*. При более высоком $\frac{B}{R}$ газоходы быстро забивались золой, которая удалялась из них с чрезвычайным трудом.

[1] В котлах Торникрофта—Шульца образца 1897 г. циркуляционные трубы еще применялись, что следует отнести к их недостаткам, так как они обусловливали собой увеличение веса котлов за счет сокращения длины коллекторов.

[2] Англ. пат. № 6383, 1912 г.; № 14136, 1905 г.

Таблица 91

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов			
				1	2	3	4
1	Дата испытания			10/VI	10 VI	10 VI	11/VI
2	Продолжительность испытания	Z	час.	3	3	3	3
3	Барометрическое давление	b	*мм* рт. ст.	759	759	760	757,7
4	Относительная влажность воздуха	—	%	78	67	82	95
	Топливо — мазут						
5	Элементарный состав топлива водород на сухую массу	H^c	%	12,32	12,36	12,35	12,47
6	„ углерод „ „ „	C^c	%	86,27	86,63	86,39	86,66
7	„ зола „ „ „	A^c	%	0,03	0,03	0,03	0,02
8	„ азот и кислород „ „ „	$(N+O)^c$	%	1,29	0,89	1,14	0,75
9	„ сера на рабочую „	S^p	%	0,09	0,09	0,09	0,1
10	„ влага „ „ „	W^p	%	0,88	1,27	1,42	0,88
11	Содержание механических примесей в мазуте	—	%	0,335	0,166	0,145	0,215
12	Удельный вес топлива	γ	*кг/дц*³	0,905	0,905	0,905	0,905
13	Теплотворная способность сухого мазута	$Q^c_в$	*кал/кг*	10859	10851	10869	10872
14	Теплотворная способность рабочего мазута	$Q^p_в$	„	10764	10710	10720	10780
15	Низшая теплотворная способность рабочего мазуга	$Q^p_н$	„	10100	10040	10055	10110
16	Сожжено мазута за опыт	ZB	*кг*	7215	10085	13317	15655
17	„ „ за 1 час	B	*кг/ч*	2405	3362	4439	5218
18	„ мазута на 1 *м*² поверхности нагрева котла	$\frac{B}{H_к}$	*кг/м²ч*	2,49	3,49	4,6	5,41
19	Температура мазута перед нефтеподогревателем	$(t_н)'_{н.п}$	°Ц	16	17	17,6	17,5
20	Температура мазута после нефтеподогревателя	$(t_н)''_{н.п}$	°Ц	106,4	100,3	92,0	94,1
21	Температура мазута перед форсунками	$(t_н)'_ф$	°Ц	95,9	88,2	81,4	80,4
22	Давление нефти в воздушном колпаке	$(P_н)_в$	*ати*	13,9	14,4	15,0	15,0
23	Давление нефти перед форсунками	$(P_н')_ф$	„	13,7	13,9	14,6	14,4
24	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_г}$	*т · кал/м³ч*	960	1270	1700	2100
	Вода						
25	Испарено воды за опыт	ZD	*кг*	88450	119725	157115	177050
26	Испарено воды за 1 час	D	*кг/ч*	29483	39908	52372	59017
27	Температура воды перед водяным подогревателем	$(t_в)'_{в.п}$	°Ц	15,3	15,0	15,0	15,0
	Воздух и тяга						
28	Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_{возд})'_т$	°Ц	24	23	22	24
29	Давление воздуха в котельной	$\Delta S_к$	*мм* вод. ст.	65	85	101	123
30	Давление в топке со стороны фронта котла	$(\Delta S_т)_{ф.к}$	„ „ „	12	20	36	52
31	Давление в топке сзади котла	$(\Delta S_т)_{с.з}$	„ „ „	12	20	34	49
	Продукты горения						
32	Содержание CO_2 в газах	CO_2	%	9,4	9,9	10,8	10,0
33	Содержание CO в газах	CO	%	0,09	0,04	0,03	0,03
34	Содержание CmHn	CmHn	%	0,1	0,1	0,04	0,10
35	Содержание O_2	O_2	%	8,3	8,0	6,9	7,6
36	Содержание N_2	N_2	%	82,11	81,96	82,32	82,27
37	Избыток воздуха в газах	α	—	1,63	1,56	1,43	1,54
38	Средняя температура в топке	$t_г$	°Ц	1240	1333	1421	1380
39	Средняя температура за двумя рядами труб, обращенных к топке	$(t_г)''_{II\ ряд\ тр}$	°Ц	758	805	838	865
40	Средняя температура за XIII рядом труб	$(t_г)_{XIII\ ряд\ тр}$	°Ц	467	514	553	580
41	Средняя температура в дымовой трубе	$(t_г)_{ух}$	°Ц	341	394	439	457

Продолжение табл. 91

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов			
				1	2	3	4
	Пар						
42	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	16,9	17,3	17,8	17,2
43	Влажность пара	$1-x$	%	3,5	8,9	8,9	4,8
44	Тепло, сообщаемое 1 *кг* воды для превращения его в пар	$\Delta i_{пе}$	*кал/кг*	640,8	615,5	616,6	635,3
45	Испарено воды первыми двумя рядами труб в % от общей паропроизводительности котла	$d_{I\ и\ II\ р}$	%	65,06	64,2	67,37	63,48
46	Поверхность нагрева I и II ряда в % от всей поверхности нагрева	$h_{I\ и\ II\ р}$	%	6,4	6,4	6,4	6,4
47	Испарено воды в % от общей паропроизводительности котла с III по XIII ряд	$d_{III\ по\ XIII\ р}$	%	24,72	24,66	29,73	36,63
48	Поверхность нагрева с III по XIII р. в % от всей поверхности нагрева	$h_{III\ по\ XIII\ р}$	%	43,1	43,1	43,1	43,1
49	Испарено воды последними 11 рядами в % от общей паропроизводит. котла	$d_{XIV\ по\ XXIV\ р}$	%	6,2	8,3	9,73	12,94
50	Поверхность нагрева последних 11 рядов в % от всей поверхности нагрева	$h_{XIV\ по\ XXIV\ р}$	%	50,5	50,5	50,5	50,5
51	Среднее паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	30,6	41,4	54,3	61,2
52	Испарительность топлива	$И$	*кг/кг*	12,26	11,87	11,8	11,31
53	Тепловое напряжение первых двух рядов труб	$\frac{Q}{H}_{I\ и\ II\ р}$	*т · кал/м³ч*	198,2	271	350,5	384,2
54	Тепловое напряжение для последних 11 рядов труб	$\frac{Q}{H}_{III\ по\ XIII\ р}$	„	11,23	15,2	18,33	23,3
55	Тепловое напряжение для последующих 11 рядов труб	$\frac{Q}{H}_{XIV\ по\ XXIV\ р}$	„	3,97	5,12	6,0	8,22
	Тепловой баланс котла						
56	К. п. д. котла, подсчитанный по $Q_в^с$	$\eta_к$	%	72,76	68,05	67,64	66,18
57	Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	24,39	26,63	27,49	30,16
58	Незамеренные потери	$100-q_2-\eta_к$	%	2,85	5,28	4,87	3,36
59	К. п. д. котла, подсчитанный по $Q_н^р$	$\eta_к$	%	77,45	72,62	72,12	70,84

Перед империалистической войной котлы Нормана начали приспосабливать к нефтяному отоплению. Более подробные характеристики котлов Нормана могут дать материалы испытания сдвоенного котла типа Нормана для миноносца «Лейтенант Ильин» [1] (рис. 275а). Ниже приведены общие данные об испытуемом котле.

Год постройки	1915
Место постройки	Путиловская верфь (Петербург)
Поверхность нагрева котла	964 $м^2$
Из нее:	
пов. нагр. двух рядов труб	62 „
„ „ следующих 11 рядов труб	416 „
„ „ последних 11 рядов труб	486 „
Поверхность зеркала испарения	6,6 $м^2$
Объем водяного пространства котла	13,78 $м^3$
Объем парового пространства котла	3,83 „
Объем топки	27,76 „
Длина коллекторов (верхнего)	4,310 $м$
„ „ (нижнего)	4,637 „
Диаметр верхнего коллектора	1,470 „
Диаметр нижнего коллектора	0,70 „
Диаметр трубок первых 2 рядов труб	39/45 $мм$
Число трубок первых 2 рядов труб	168 шт.
Число трубок последних 22 рядов труб	3532 шт.

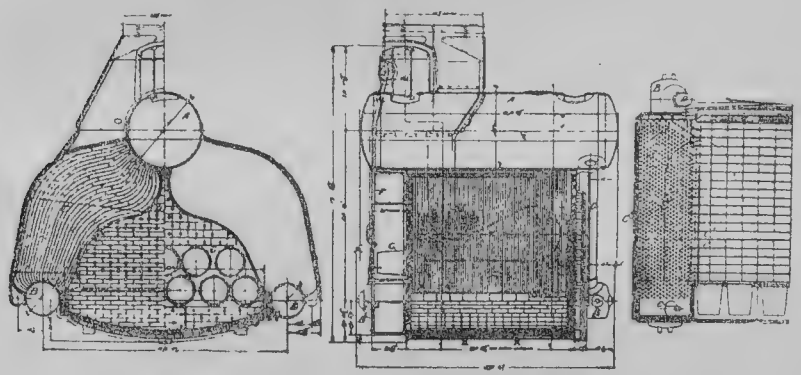


Рис. 275. Котлы Нормана.

Испытание котла производилось на станде Путиловской верфи 10 и 11 июня 1916 г. Основные данные испытания приведены в табл. 91.

Из всех данных таблицы обращает на себя внимание неравномерная паропроизводительность отдельных рядов труб; первые два ряда труб, составляющие 6,4% от всей поверхности нагрева, производили 63,48—67,37% пара. Последние же 11 рядов труб, составляя 50,5% всей поверхности нагрева, давали лишь 6,2—12,94%. Данные опытов показывают, что, если из котла удалить половину поверхности нагрева, от этого паропроизводительность уменьшилась бы всего примерно на 10%. Зато паронапряжение поверхности нагрева увеличилось бы вдвое, а одновременно уменьшился бы и вес котла на 1 $т$ пара. Впоследствии из этого факта был сделан практический

[1] Отчет об испытании сдвоенного водотрубного котла Нормана для миноносца «Лейтенант Ильин» С. Вяхирева помещен в Известиях по механической части флота. Вып. VII, стр. 113—144, 1918.

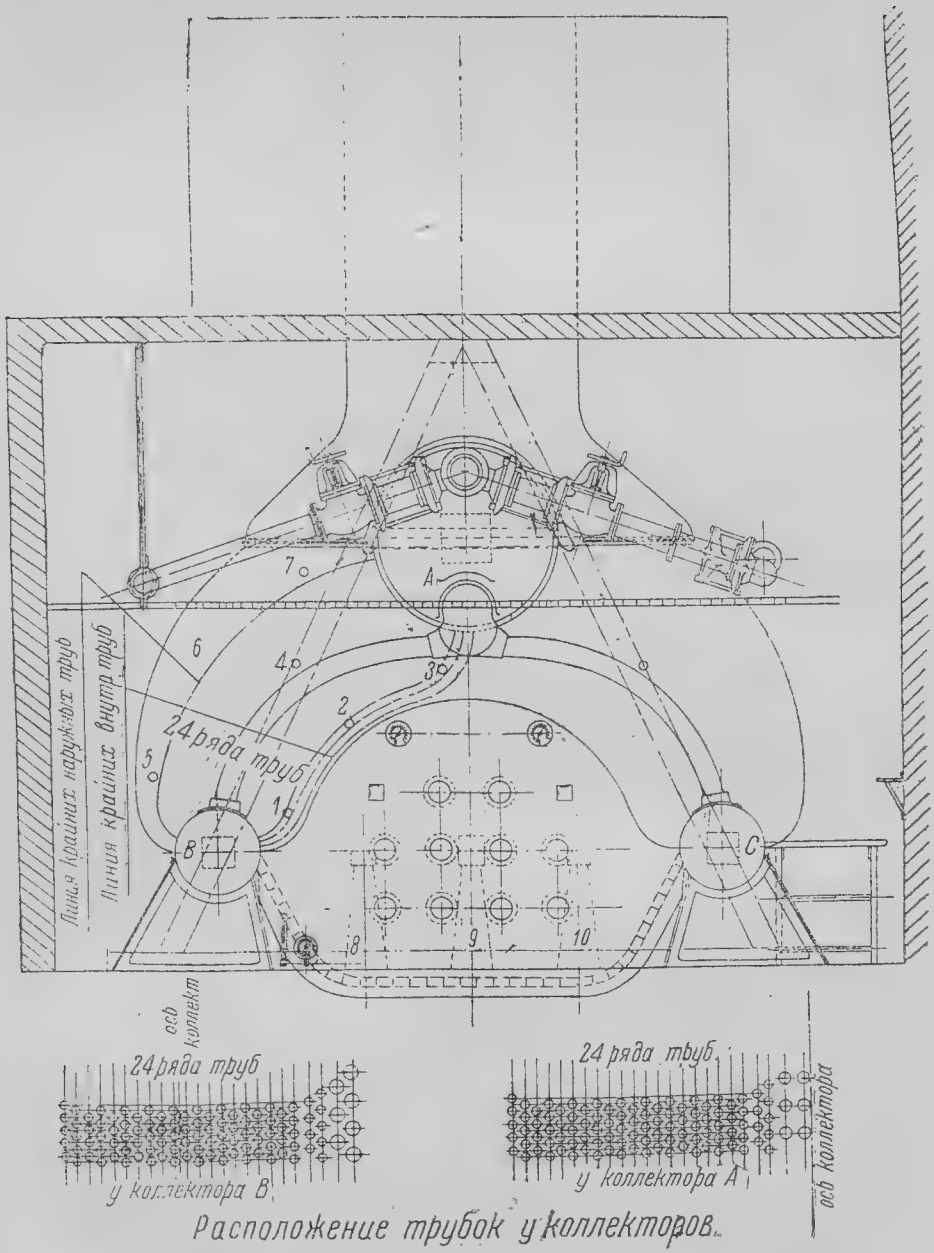


Рис. 275а. Котел Нормана.

вывод: поверхность нагрева котла составляли из меньшего числа рядов труб. Правда, при этом повышалась температура уходящих газов, а вместе с ней росли и потери тепла с уходящими газами (q_2). Для понижения q_2 за поверхностью нагрева котла устанавливали воздухоподогреватели и водяные экономайзеры. Поверхность нагрева последних использовалась значительно эффективнее, чем, например,

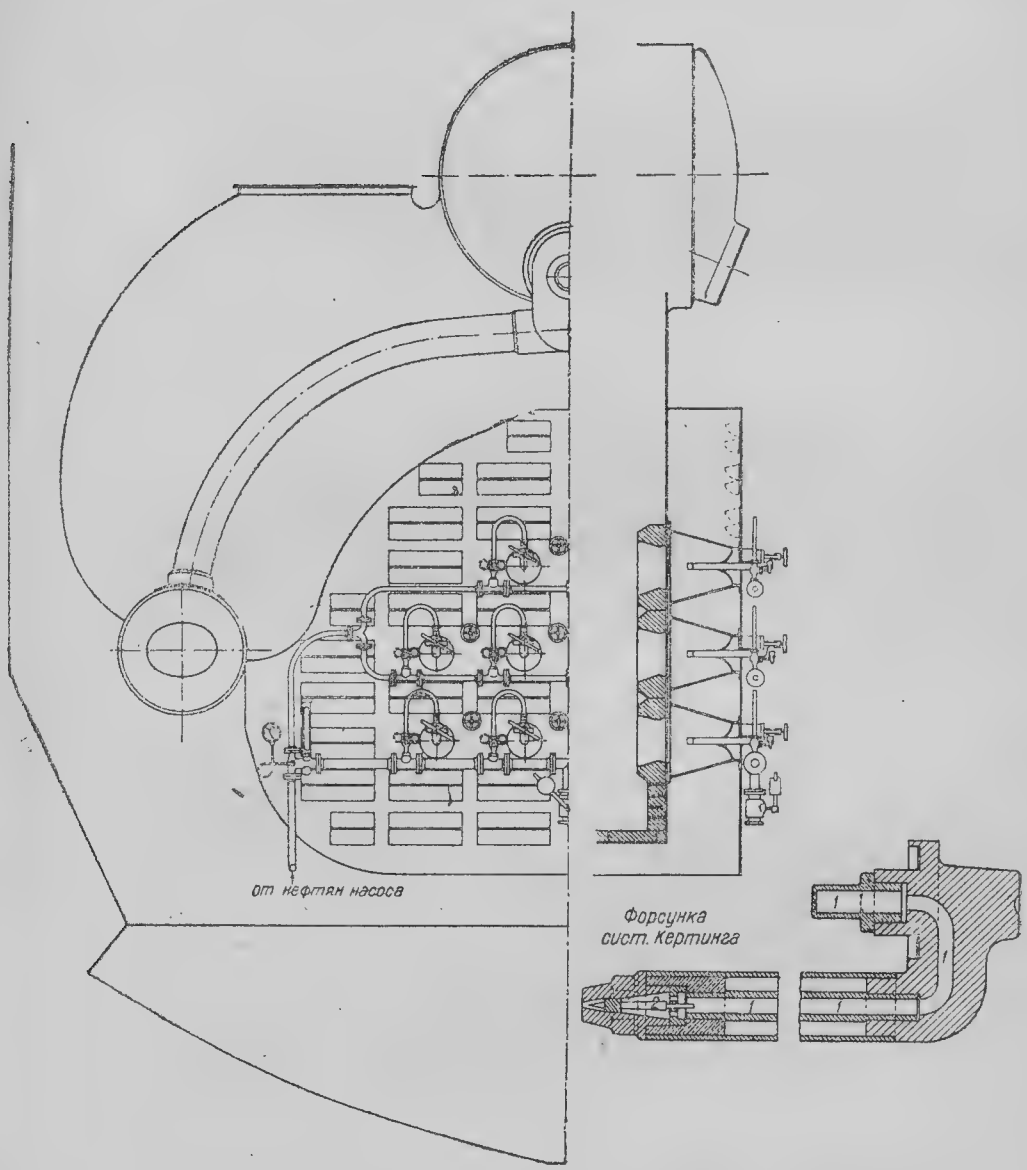


Рис. 275а. Котел Нормана.

последние 12 рядов 24-рядного котла, а при прочих равных условиях разница температур газов и воды или воздуха у водяных экономайзеров и воздухоподогревателей была больше, чем у последних рядов труб 24-рядного котла.

Во время испытания определялись такие деформации котла:

1) изменение расстояния между осями коллекторов,

2) изменение длины коллекторов,
3) изменение стрел прогиба коллекторов.

Расстояние между осями коллекторов измерялось с помощью штангенциркуля. Последний, во избежание прогиба от собственного веса, был изготовлен из стальной трубы диаметром 80 *мм*. Одна из ножек циркуля была сделана неподвижной, а другая могла перемещаться посредством микрометрического винта с шагом в 1 *мм*. Головка винта была разделена на 20 частей, так что одно деление соответствовало 0,05 *мм*.

Измерение длины коллекторов производилось так: против коллекторов на неподвижных опорах укреплялись пластинки, на которых

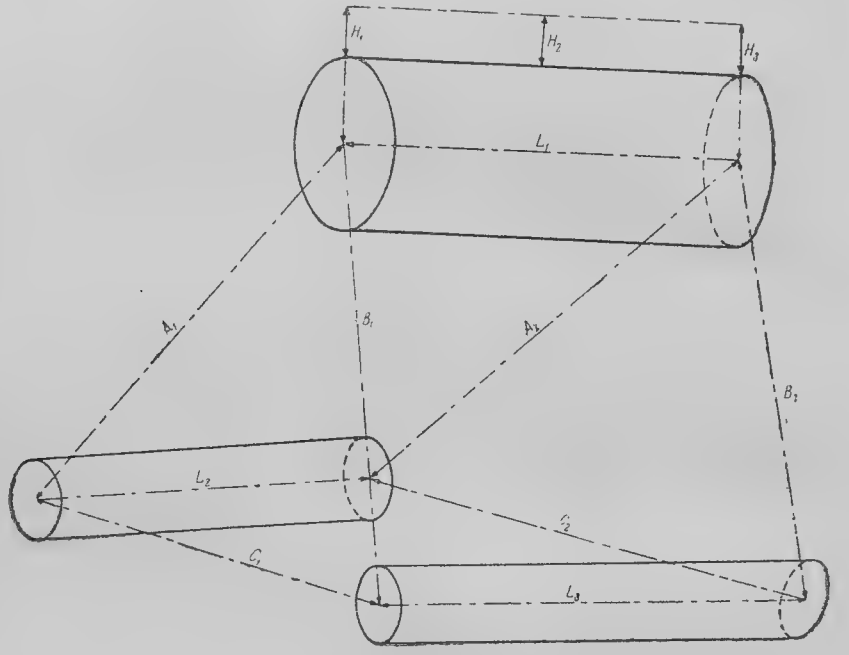


Рис. 275b. Способ замера деформации в котле Нормана.

отмечали точки против центров днищ коллекторов. Посредством внутромеров измерялось расстояние между центрами днищ коллекторов и точками, отмеченными на упомянутых пластинках. Стрела прогиба верхнего коллектора измерялась катетометром. Результаты замеров показаны в табл. 91а, а способ замеров — на рис. 275b.

Нормановские котлы получили большое распространение в США, где их ставили главным образом на миноносцы. Кроме судов США, нормановские котлы стоят и по настоящее время на миноносцах Испании, Польши и Дании.

181. Котлы Дю-Тампля — Гюйо

Котлы Дю-Тампля — Гюйо представляли собой почти точную копию нормановских котлов, с той лишь разницей, что кипятильные трубки в котле Дю-Тампля в верхней части топки образовывали собой полуцилиндрическую поверхность. Котлы Дю-Тампля — Гюйо получили весьма широкое применение во Франции на миноносцах. Рассматриваемые котлы отапливались нефтью. По опытным данным на мино-

Таблица 91а

Величины, обмеренные при определении деформации котла	Изменения данных величин при наполнении котла водой, в *мм*	Изменения этих же величин при 4-м режиме котла (расход нефти 5 *кг/м²* час)
A_1	— 0,65	+ 5,65
A_2	— 0,15	+ 8,06
B_1	— 3,55	+ 4,15
B_2	+ 2,35	+ 7,10
C_1	+ 0,55	+ 3,05
C_2	+ 18,40	+ 18,40
H_1	+ 1,53	не определялись
H_2	+ 0,06	
H_3	— 1,30	
L_1	— 9,66	+ 7,06
L_2	— 1,48	+ 5,56
L_3	+ 5,68	+ 14,58

носце «Fourche» водоизмещением в 725 *т* с котлами Дю-Тампля — Гюйо расходовали на полном ходу за 6 часов в среднем 0,562 *кг* нефти на 1 *и. л. с. ч.*

182. Котлы Бельвиля

Отличительной особенностью котлов Бельвиля[1] являлся зигзагообразный путь воды в кипятильных трубках. Помимо этого в котлах Бельвиля уровень воды поддерживался не в паровом коллекторе, как почти у всех котлов, а во втором или третьем ряду трубок сверху.

Диаметр парового коллектора получался небольшим — около 500 *мм*, а самое главное то, что вес воды в котле составлял обычно около 8% веса всего котла. Котлы Бельвиля состояли из 8—14 секций кипятильных труб, длиной приблизительно по 2 *м*. Диаметр кипятильных трубок был принят заводом равным 100—115 *мм*. В каждую трубную секцию входило по 14 трубок. Последние располагались в газоходе под углом в 4°. Сверху котла устанавливался экономайзер, состоящий так же, как и котел, из секций, с той лишь разницей, что трубки у него были меньшего (70—88 *мм*) диаметра.

Питание котла производилось в нижний коллектор экономайзера. Из нижнего коллектора вода поднималась по трубкам экономайзера в его верхний коллектор. По пути вода подогревалась до 70—100°. Затем из верхнего коллектора экономайзера вода по трубе направля-

[1] Нем. пат. заявл. в 1913 г. №№ 320742, 3; заявл. в 1914 г. №№ 320744, 45, 46, 47. Англ. пат., № 8833, 1914 г.; № 11782, 1901 г.

лась в паровой коллектор, куда она попадала через клапан в виде тонкой струи. Из парового коллектора вода спускалась по циркуляционным трубам в водяной коллектор, а из него распределялась по секциям котла. Проходя секции, вода частично превращалась в пар и снова вступала вместе с образовавшимся паром в паровой коллектор. На всем пути вода встречала чрезвычайно большие гидравлические сопротивления. Так, например, для преодоления гидравлических сопротивлений от питательного насоса до парового коллектора необходимо было подавать воду в паровой коллектор под давлением в 40 *ати*, при давлении пара в котле в 20 *ати*.

Велики гидравлические сопротивления и в секциях котла, объясняющиеся тем, что пароводяная смесь должна сделать 28 поворотов, каждый на 90°, и пройти путь длиной примерно в 28 *м*. Напор воды, определяемый высотой столба ее от парового до водяного коллектора котла, совершенно недостаточен для преодоления возникающих в секциях котла гидравлических сопротивлений движению воды. Циркуляция воды в котлах Бельвиля была весьма слабой, что ограничивало форсирование их работы. Продолжительная работа котлов даже при $\frac{B}{R}$ = 150—160 *кг/м²ч* вела к прогибанию нижних рядов кипятильных трубок с последующим выходом котла из строя. При умеренной нагрузке и правильном уходе бельвилевские котлы оказывались довольно прочными и надежными в работе. Экономично котлы работали лишь при $\frac{B}{R}$ =90—100 *кг/м²ч*. В этом случае испарительность угля колебалась в пределах от 7,5 до 9. Ввиду невозможности форсировать работу бельвилевских котлов, их не приспосабливали ни к смешанному ни к нефтяному отоплению. Пока требования к форсировке котлов были не очень высоки, бельвилевские котлы были наиболее распространенными из всех водотрубных котлов.

Но начиная с 900-х гг. распространение котлов Бельвиля резко сократилось, так как прогресс военной техники и подготовка к новой империалистической войне сделали необходимым увеличение быстроходности военных судов, в первую очередь за счет интенсификации работы котлов. Если бы изобретение В. Я. Долголенко 1907 г. не позволило усилить циркуляцию воды в котлах Бельвиля, последние были бы вытеснены другими системами котлов, даже и на их родине— во Франции.

183. Котлы Долголенко

Изобретение инженера В. Я. Долголенко[1] мы приводим в том виде, как оно описано в его привилегии № 19161 от 21 мая 1911 г. (заявлено изобретение 8 декабря 1907 г.).

«Рис. 276 представляет продольный разрез предлагаемого котла. Рис. 276а дает вид котла спереди, причем видна часть элементов котла с фасада, а часть трубок — элементы — показана в разрезе. Элемент состоит из двух змеевидно и параллельно расположенных серий труб (коллектора) таким образом, что на нитательном коллекторе *35* расположены спереди нижние коробки *1*. От этих коробок сзади и наклонно кверху — две нижние параллельные трубки *2* и *18*, из которых каждая составляет собой нижнюю первую трубку, соответствующую серии трубок. Таким образом вода, пройдя через

[1] Нем. пат., № 200152, 1907 г.; № 203503, 1908 г.

коробку *1* и нижнюю трубку *2* первой серии, попадает затем в заднюю коробку *3*, из которой по трубке *4* возвращается вновь в следующую переднюю коробку *5*, из которой опять по следующей трубке *6* идет к следующей коробке *7* и т. д. в последовательности номеров, вплоть до верхней коробки *17*, из которой по особому патрубку *33* переходит в парособиратель *34*.

Совершенно подобным же образом движется вода по другой серии труб, образуя собой совершенно самостоятельный, параллельно описанному восходящий поток, а именно из нижней коробки *1* по нижней трубе *18* вода переходит в заднюю коробку *19*, из которой по трубке *20* возвращается в следующую переднюю коробку *21*, из которой вновь по трубе *22* опять направляется в заднюю коробку *23* и т. д. в последовательности номеров, вплоть до коробки *17*, из кото-

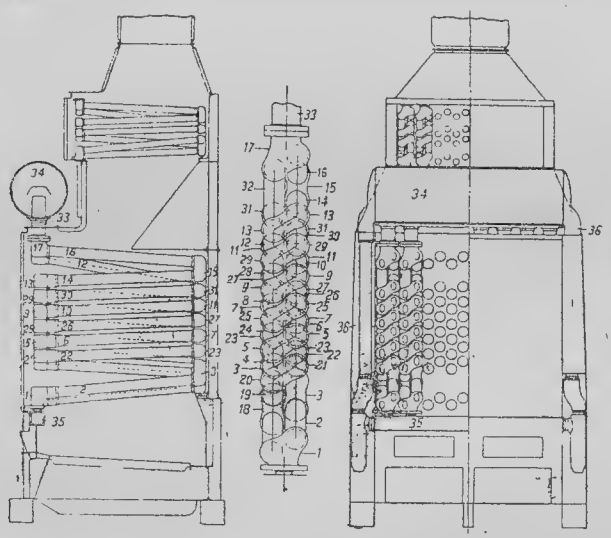


Рис. 276 и 276а. Котел Долголенко.

рой по патрубку *33* падает в парособиратель *34*. Как нижняя коробка *1*, так и верхняя коробка *17* и патрубок *33* могут быть или общими для обеих серий упомянутых труб, или отдельными для каждой серии труб. Расположение частей каждой серии представляет собой подобие винтовой линии, а весь элемент — подобие винта с нарезкой в две нитки.

Конечно, представляется возможным построение элемента и с большим числом серий. Если котел снабжается подогревателем питательной воды или перегревателем пара, то таковые могут быть составлены из элементов, построенных совершенно подобно описанным генераторам. Поступившая в парособиратель *34* вода по трубкам обратной воды *36* возвращается вновь в питательный коллектор *35* для того, чтобы снова пойти в серию водогрейных трубок.

Предмет привилегии — секциональный водотрубный котел типа Бельвиля, характеризующийся составлением каждой секции из двух серий элементов с общими конечными камерами *1* и *17*, каковые элементы состоят из труб *2-4-6* и т. д. и коробок *3-5-7* и т. д., причем коробки расположены с наклоном к горизонту, так что движущиеся по ним потоки воды и пара восходят вверх наподобие винта в две нитки».

Таким образом в котле В. Я. Долголенко число поворотов и путь движения пароводяной смеси уменьшены в 1,75 раза (вода проходит не 14 труб, как в котлах Бельвиля, а только 8). В связи с этим гидравлические сопротивления движению пароводяной смеси в котлах Долголенко были уменьшены в сравнении с бельвилевскими котлами в несколько раз.

Уменьшение гидравлических сопротивлений в котле Долголенко вызвало в нем значительное улучшение циркуляции воды. В результате при испытании этого котла на Балтийском заводе совершенно свободно можно было поддерживать $\frac{B}{R} = 200$ *кг/м²ч*.

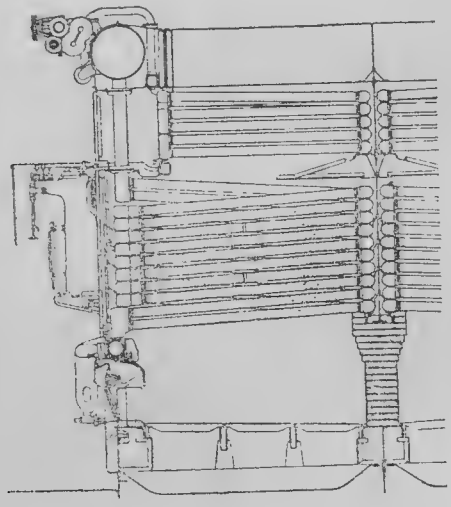


Рис. 277. Котел Бельвиля—Долголенко.

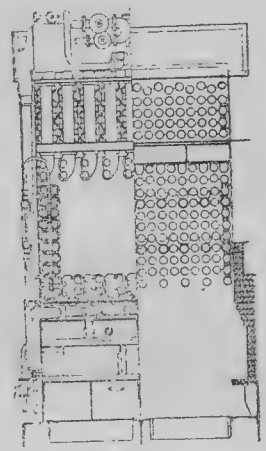


Рис. 278. Котел Бельвиля—Долголенко.

184. Котлы Бельвиля—Долголенко

Котел Бельвиля — Долголенко [1] (рис. 277, 278)представляет собой почти точную копию котла Долголенко. В самом деле, фирма Бельвиля ввела в конструкцию котла Долголенко лишь незначительные изменения. Как и у котла Долголенко, кипятильные трубки образуют как бы винтовую нарезку в две нитки.

Диаметр кипятильных трубок в котлах Бельвиля—Долголенко заводом был принят равным 82/73 *мм* у двух нижних рядов и 82/75 *мм* у остальных рядов труб; трубки экономайзера имели диаметр 82/76 *мм*.

К преимуществам рассматриваемого котла в сравнении с котлами Долголенко следует отнести несколько больший напор воды, преодолевающий гидравлические сопротивления в кипятильных трубках. Паровой коллектор поднят выше экономайзера, в связи с чем высота столба воды между паровым и водяным коллекторами больше. Это преимущество вызвало и свои недостатки. Главные из них: затруднение осмотра, очистки и смены труб экономайзера.

Несмотря на значительные улучшения, циркуляция воды в этих котлах оставалась все же недостаточной, чтобы можно было значительно повысить интенсивность работы поверхностей нагрева. Макси-

[1] Нем. пат. заявл. в 1913 г. № 320742. 3, заявл. в 1914 г.; № 320744, 45, 46, 47. Англ. пат. № 8833, 1914 г.; № 11782, 1901 г.

мально допустимое весовое напряжение решетки у них поддерживалось равным 200 *кг/м²ч*. Котлы Бельвиля — Долголенко получили даже во Франции ограниченное применение.

185. Котлы Никлосса

Котлы Никлосса[1] (рис. 279) так же, как и котлы Бельвиля, пытались применять почти во всех флотах для больших военных судов, но от них всюду скоро отказались, за исключением Франции и Италии, где их продолжали ставить и в 1905—1912 гг.

При разработке котлов Никлосса основной упор был положен на легкую разбираемость конструкции и получение хорошей циркуляции воды. Данная задача в котлах Никлосса выполнена хорошо. В этом отношении они были тогда лучшими водотрубными котлами.

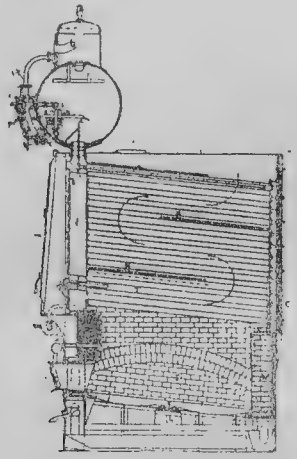


Рис. 279. Котел Никлосса.

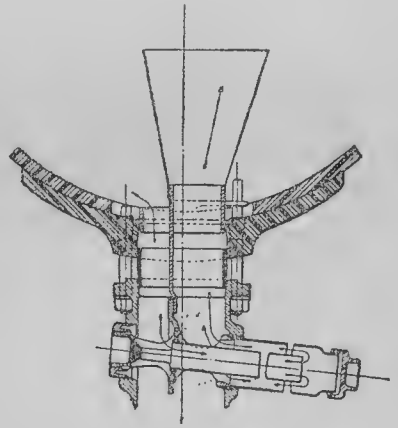


Рис. 280. Разрез водяной камеры и трубок.

Хорошая циркуляция воды в котлах Никлосса конструктивно обеспечивалась тем, что во все кипятильные трубки вставлялись внутрь циркуляционные трубки. Питательная вода поступала во внутреннюю трубу, пройдя ее, переходила в кольцевое пространство трубок, где частично превращалась в пар за счет теплоты газов. Из кольцевого пространства пароводяная смесь по задней половине камеры поступала в паровой коллектор. Водяные камеры по внешнему виду напоминали собой камеры Бабкока и Вилькокса. На рис. 280 показан разрез водяной камеры по кипятильным трубкам. Стрелками отмечен путь воды и пароводяной смеси. Обращает на себя внимание способ присоединения водяной камеры к паровому коллектору. Соединение осуществлялось на болтах, и поэтому водяные камеры могли быть быстро и легко разъединены с коллектором. К другим преимуществам котлов Никлосса следует отнести:

1) легкость замены кипятильных трубок,

2) доступность к внутреннему осмотру трубок путем отвертывания накидной пробки с задних концов трубок,

3) возможность свободного теплового расширения кипятильных и циркуляционных трубок.

[1] Англ. пат., № 1879, 1910 г. Нем. пат., № 233683, 231699, 1909 г.; № 257412, 1912 г.

Котлы Никлосса, построенные до 90-х гг. XIX в., имели очень низкий к. п. д. Для устранения указанного недостатка в котлах начала XX в. Никлосс начал устанавливать по три шамотных перегородки. Последние уменьшали сечение для прохода газов и удлиняли их путь. Это вызывало увеличение скоростей газов и повышение к. п. д. котла за счет понижения температуры уходящих газов. Одновременно повышалось и паронапряжение поверхности нагрева котла.

Новые преимущества котла Никлосса обусловили появление в нем новых недостатков. Главнейшие из них: увеличение сопротивлений движению газов и возможность заноса золой поверхностей нагрева в местах поворотов газов. В связи с этим, при отоплении котла углем с повышенной зольностью, к. п. д. котла и паронапряжение поверхности нагрева были не выше, а даже ниже, чем в котлах Никлосса 90-х гг. XIX в.

К другим недостаткам котлов Никлосса начала XX в. можно отнести:

1) увеличение веса котла за счет циркуляционных трубок, которые не принимают непосредственного участия в теплопередаче;

2) сложность технологического процесса обработки отдельных частей котла (камеры, фонари, трубки и т. д.);

3) невозможность производить удаление воды из кипятильных трубок во время продувания котла. Вода может быть удалена лишь после открытия лючков с задних концов труб;

4) слабую циркуляцию воды в нижних рядах трубок ввиду больших гидравлических сопротивлений движению пароводяной смеси в водяных камерах. Из-за недостаточной циркуляции воды в нижних трубках часто наблюдалось перегорание последних;

5) необходимость после двух недель действия котлов производить осмотр и очистку труб, что требовало очень много времени и хлопот.

Без особого вреда для котлов в них можно было достигать $\frac{B}{R} = 150$ *кг/м²ч*. 1 *кг* угля мог испарять от 8 до 9 *кг* воды. Все перечисленные здесь недостатки котлов Никлосса побудили Италию и даже Францию — их родину — сокращать дальнейшее распространение рассматриваемых котлов. В настоящее время котлы Никлосса сохранились лишь на кораблях постройки 1906—1912 гг. По данным справочника Джена[1] на кораблях более поздней постройки котлы Никлосса уже не ставились.

186. Котлы Бабкока и Вилькокса

Котлы Бабкока и Вилькокса (рис. 281) состояли из отдельных трубных секций. Каждая трубная секция была составлена из двух рядов труб, расположенных змейкой в затылок. Камеры секций имели зигзагообразную форму. Общее устройство котла, топки и газоходов видно из рис. 281.

В котлах Бабкока и Вилькокса настоящей конструкции по сравнению с котлами образца 1899 г. была значительно улучшена циркуляция воды. Это достигалось постановкой двух циркуляционных труб и соединением передних и задних секций камер двумя рядами кипятильных трубок диаметром в 100 *мм*. Два ряда труб такого же диаметра соединяли задние секционные камеры с паровым коллектором. Диаметр остальных кипятильных трубок равнялся 45—50 *мм*.

[1] Jane's fighting ships. London, 1935.

В котлах же Бабкока и Вилькокса образца 1899 г. циркуляционные трубы отсутствовали, а нижние соединительные трубы диаметром в 100 *мм* составляли лишь один ряд. Нормальный диаметр кипятильных трубок для морских котлов Бабкока и Вилькокса котлостроительными заводами принят в 45—50 *мм*. Иногда же рассматриваемые котлы снабжались кипятильными трубками диаметром в 80 *мм*. Это увеличение диаметра вызывалось стремлением уменьшить возможность заноса газоходов золой.

Передние секционные камеры своими нижними концами входили в трубу квадратного сечения. Последняя с обоих концов соединялась циркуляционными трубами с водяным пространством парового коллектора. Для удлинения пути газов в поверхностях нагрева между трубками иногда устраивались шамотные щитки. Применением щитков удавалось несколько понизить температуру уходящих газов.

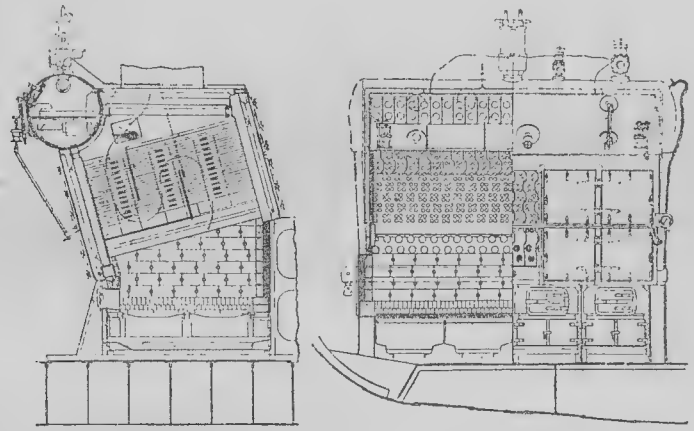


Рис. 281. Котел B и W.

Однако, за счет двух поворотов газов, вызванных постановкой щитков, значительно увеличивались газовые сопротивления. При таком устройстве газоходов активно омывалось газами только около 50—70% [1] всей поверхности нагрева.

Для защиты боковых стенок от сильного нагревания их газами трубки крайних секций расположены не змейкой, а в затылок. Трубки, находясь в соприкосновении с кожухом котла, защищают его от сильного нагревания и благодаря этому способствуют уменьшению потерь в окружающую среду.

Эти преимущества вызвали и новые недостатки, а именно уменьшение активной поверхности нагрева крайних трубок почти наполовину и опасность ржавления и разъедания этих трубок серой, так как они легко заносятся золой, содержащей в себе влагу и серу. Некоторые заводы в последнее время стали отказываться от такого способа защиты боковых стенок от действия температур.

Как показали эксплоатационные наблюдения, котлы Бабкока и Вилькокса значительно легче выдерживали максимальные нагрузки, чем, например, котлы Бельвиля и Никлосса, и поэтому для них заводы принимали $\frac{H}{R} = 42$ против 35 у котлов Никлосса. Нормаль-

[1] Кнорре Г. Ф. Тепловые расчеты котельных установок по газовому анализу. Энергоиздат. М.—Л., стр. 130, 1933

ное весовое напряжение решетки у этих котлов считалось 160 *кг/м²ч*. При некотором понижении к. п. д. можно было доводить $\frac{B}{R}$ до 210 *кг/м²ч* и выше. Котлы хорошо приспосабливались к смешанному отоплению. Полный вес котла на 1 *и. л. с. ч* в среднем составлял около 45 *кг*.

В эксплоатационной проверке котлы оказались надежными в работе. В американском военном флоте в 1910—1912 гг. единственным типом котлов для линкоров и крейсеров были приняты котлы Бабкока и Вилькокса. В английском же флоте адмиралтейским типом котлов для линкоров и крейсеров считались эти котлы и котлы Ярроу. Котлы Бабкока и Вилькокса получили широкое применение в настоящее время в таких крупных морских державах, как Англия и Америка.

В заключение приведем некоторые общие характеристики основных типов котлов, установленных на военных кораблях (табл. 92).

Как показывают данные этой таблицы, водотрубные котлы военных кораблей после 1910 г. давали весьма хорошие характеристики. $\frac{D}{H_к}$ колебалось в пределах 61—112 *кг/м²ч*, $\frac{G_к}{D}$ = 550—925 *кг/т* и $\frac{G_к}{H_к}$ = 86—47 *кг/м²*. Одновременно в этих котлах удалось устранить основной недостаток судовых водотрубных котлов XIX в. — низкий к. п. д. котла. По данным таблицы, к. п. д. котла колебался в пределах 68—80%, тогда как к. п. д. судовых водотрубных котлов XIX в. колебался в пределах 45—65% (табл. 71).

ОСНОВНЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОГНЕТРУБНЫХ КОТЛОВ В 1900—1935 ГГ.[1]

187. Получение перегретого пара

Вопрос о выборе типа котлов для военных судов после Русско-японской войны 1905 г. был окончательно разрешен в пользу водотрубных котлов. Но строители огнетрубных котлов не хотели сдаваться без боя. Чтобы закрепить преобладающее распространение цилиндрических огнетрубных котлов в коммерческом флоте и окончательно не потерять такого крупного потребителя, каким был раньше военный флот, котлостроители использовали все свои технические средства для дальнейшего усовершенствования огнетрубных котлов. Они поощряли изобретения, направленные к повышению к. п. д., щедро отпуская средства на реализацию их.

Работа над увеличением к. п. д. котла вновь привела к идее применения перегретого пара. Для постройки силовой установки, экономично и надежно работающей на перегретом паре, нужно было преодолеть те препятствия, из-за которых, во второй половине XIX в. применение перегретого пара потерпело неудачу. Основным тормозом внедрения перегретого пара в судовые силовые установки была плохая сопротивляемость смазочных материалов высокой температуре пара.

При температуре пара в 200° Ц, применяемое тогда масло испарялось, машина давала стуки, разбалтывалась и сильно изнашивалась. Иногда же дело кончалось поломками. Для удовлетворительного

[1] Müller. Die Schiffsmaschine. Стр. 190—214, Braunschweig, 1908.

Таблица 92 [1]

№ по пор.	Наименование	Обознач.	Размерность	Типы военных кораблей						
				линкор	эсминец	крейсер	эсминец	крейсер	крейсер	посыльное судно
1	Год испытания			1912	1915	1918	1924	1924	1929	1930
2	Тип котла				двухстор.		Нормана	Нормана	B и W экспресс	—
3	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	371,6	964	697	925	1100	1105	278,5
4	Вес котлов (без воды)	$G_к$	$т$	31,4	—	43,5	—	—	52	—
5	Объем топки	$V_т$	$м^3$	12,5	27,8	21,2	32,8	42,0	32,2	9,2
6	Поверхность нагрева перегревателя	$H_{пе}$	$м^2$	—	—	70	—	—	—	49,4
7	Давление пара	$P_к$	$ати$	18	18	18	18	18	20	21
8	Перегрев пара	$\Delta t_{пе}$	°Ц	—	—	21	—	—	—	16
9	Испарено воды	D	$кг/ч$	34000	59017	78000	78550	83000	84500	21920
10	Сожжено нефти	B	»	2200	5218	5150	5350	6440	5400	1910
11	Общий к. п. д. котла	η	%	76,5	78,4	76,2	77	74,01	80,3	68,0
12	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	91,5	61,2	112	85	75,5	76,5	78,5
13	Паронапряжение поверхности нагрева котла + перегрев	$DH_{к+пе}$	»	—	—	102	—	—	—	67,7
14	Давление воздуха	ΔS	$мм$ вод. ст.	200	124	241	268	275	193	150
15	Вес котла на 1 $т$ пара	$\frac{G_к}{D}$	$кг/т$	924	—	557	—	—	616	—
16	Вес котла на 1 $м^2$	$\frac{G_к}{H_{к+пе}}$	$кг/м^2$	85,7	—	56,7	—	—	47	—

[1] См. Техническая энциклопедия, т. 11, стр. 287.

разрешения вопроса о применении перегретого пара нужно было: 1) найти огнестойкие смазочные материалы и 2) сальниковую набивку.

Эта изыскательная работа успешно закончилась лишь на пороге XX в. Было найдено, что наилучшим огнестойким смазочным материалом является минеральное масло (по опытам Deutschen Vakuum Öl Co. Hamburg).

Эксплоатационные наблюдения показали, что минеральное масло, имея температуру воспламенения выше 350°, свободно выдерживало температуру перегретого пара в 300°. Наряду с этим были разработаны и опробованы в работе металлические сальниковые кольца. Ими заменяли сальниковые набивки в машинах, работающих на перегретом паре (в старых машинах в качестве сальниковой набивки применяли асбестовый шнур).

Возможность применения в судовых силовых установках перегретого пара значительно возросла с тех пор, как на суда начали устанавливать паровые турбины. В начале XX в. судовые паровые турбины допускали перегрев пара до 350° Ц.

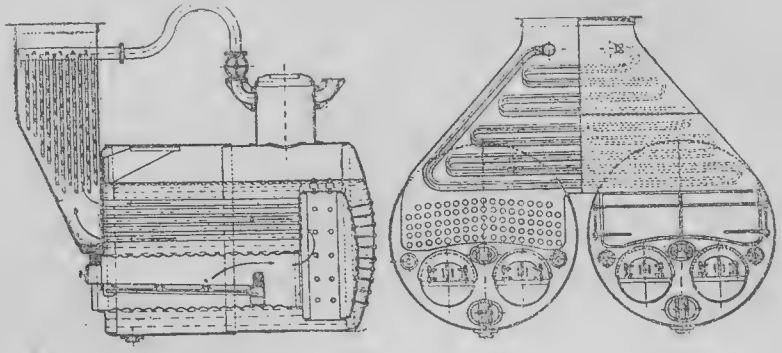


Рис. 282. Пароперегреватель Бютнера.

Удовлетворительному разрешению вопроса применения перегретого пара способствовали также выросшие технические средства заводов и накопление последними богатого конструкторского опыта. Заводы научились строить компактные пароперегреватели, работающие с более высокой тепловой нагрузкой, чем раньше. За десятилетие с 1898 по 1908 г. 2200 локомотивов были снабжены пароперегревателями Шмидта. За это время перегреватели Шмидта были поставлены на 101 пароходе коммерческого и военного флота.

Рассмотрим устройство пароперегревателей, получивших наибольшее применение в судовых огнетрубных котлах в 1900—1910 гг.

188. Пароперегреватель Бютнера

На рис. 282 показан пароперегреватель Бютнера [1].

Располагается он в дымовой коробке, общей для двух котлов. При таком размещении получается хорошее обтекание газами поверхностей пароперегревателя. Тепловая нагрузка у всей поверхности нагрева почти одинакова. Перегреватель получается компактным, а главное, в нем легко производить наружную очистку труб.

[1] Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Стр. 221—264, 1907. Die Dampfüberhitzung und ihre Verwendung im Schiffsbetriebe. Vorgetragen von H. Mehlis. Charlotenburg (Diskussion, стр. 265—274).

Несмотря на все эти преимущества, рассматриваемый перегреватель получил ограниченное применение, и сами преимущества обусловили собой появление в котле ряда недостатков. Главными из них являются большой вес и малая нагрузка поверхностей нагрева.

189. Перегреватель Шмидта

Более совершенен перегреватель Шмидта[1]. Как видно из рис. 283, все трубки перегревателя Шмидта расположены в одной дымогарной трубе большого диаметра. По внешнему виду этот перегреватель напоминает как бы куст, поэтому его называют кустовым пароперегревателем. Свежий пар из котла поступает в кольцевой наружный канал коробки перегревателя. Из канала пар распределяется по труб-

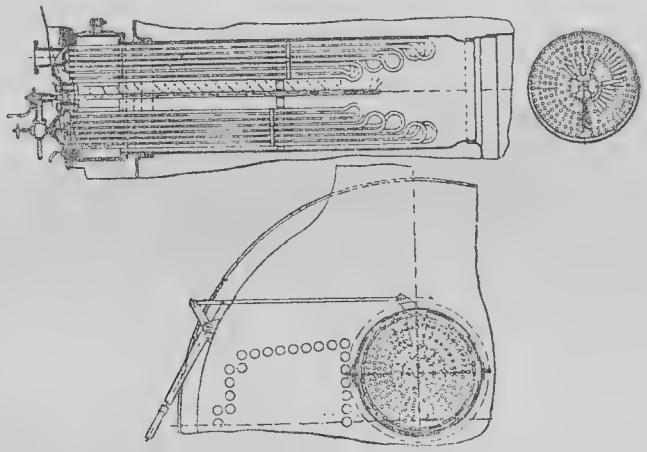


Рис. 283. Кустовой пароперегреватель Шмидта.

кам. Пройдя трубки, пар поступает во второй соседний канал меньшего диаметра. Из второго канала пар переходит по трубкам в третий канал и, наконец, из третьего — в четвертый. Пар проходит последовательно три кольцевых пучка труб, на этом пути перегревается и отводится к потребителю из внутреннего кольцевого канала коробки перегревателя. Последняя состоит из чугунной крышки и трубной доски. Крышка скрепляется с доской при помощи болтов. Преимуществом кустового пароперегревателя Шмидта является расположение поверхностей нагрева в области высоких температур.

Как показали эксплоатационные наблюдения, количество тепла, воспринимаемое поверхностью нагрева, при прочих равных условиях прямо пропорционально средней разнице температур газа и пара в пароперегревателе. При большой разнице температуры газов и пара для восприятия одного и того же количества тепла потребуется меньшая поверхность нагрева. Зависимость величины поверхности нагрева от разницы в температуре газов и пара видна из нижеприводимого ориентировочного подсчета. Последний дает представление о том, насколько можно уменьшить поверхность нагрева пароперегревателя, если мы перенесем его из дымовой коробки в дымогар-

[1] Русский патент, № 35878, 1908 г.

ную трубу. Разность средних температур пара и газов для обоих случаев будет равна:

$$\Delta t_{д.к} \cong 375{,}0 - 250 = 125;\ \Delta t_{д.к} = \frac{(t_г)'_{пе} + (t_г)''_{п}}{2} - \frac{t'_{п} + t''_{п}}{2} =$$

$$= \frac{450 + 300}{2} - \frac{300 + 200}{2} = 125°;\quad \vartheta_{д.тр} = \frac{1000 + 300}{2} -$$

$$- \frac{300 + 200}{2} = 400.$$

Если принять во внимание, что скорости газов, диаметры и длина трубок в обоих случаях будут одинаковы, а отношение коэфициентов теплопередачи для данных условий равно $\frac{k_{д.кор}}{k_{д.тр}} \cong 2$, тогда отношение поверхностей будет $\frac{H_{д.к}}{H_{д.тр}} = \frac{\left(\frac{Q_{пе}}{k\Delta t}\right)_{д.к}}{\left(\frac{Q}{k\Delta t}\right)_{д.тр}}$. Здесь $H_{д.к}$ — поверхность нагрева перегревателя при расположении его в дымовой коробке; $H_{д.тр}$ — поверхность нагрева перегревателя при расположении его в дымогарной трубе; $Q_{пе}$ — тепло, воспринимаемое перегревателем за час, в обоих случаях одинаково и поэтому сокращается; k — коэфициент теплопередачи, т. е. количество тепла, передаваемое от газов к пару через 1 $м^2$ поверхности нагрева пароперегревателя в течение часа при разнице температур газов и пара в 1° Ц; Δt — средняя разность температур газов и пара.

Подставляя теперь в формулу численные значения, получим:

$$\frac{H_{д.к}}{H_{д.тр}} = \frac{k_{д.тр} \cdot \Delta t_{д.тр}}{k_{д.к} \cdot \Delta t_{д.к}} = \frac{k_{д.тр} \cdot \Delta_{д.тр}}{2k_{д.тр} \cdot \Delta t_{д.к}} = \frac{1 \cdot 400}{2 \cdot 125} = 1{,}6.$$

Этот грубый подсчет показывает, что перенесение перегревателя в дымогарную трубу позволяет уменьшить поверхность нагрева пароперегревателя приблизительно на 60%.

Кустовой перегреватель не лишен и ряда недостатков. Главный из них: возможность заноса золой поверхностей перегревателя, особенно при угольном отоплении. Наружное же загрязнение перегревателя вызывало резкое снижение температуры перегретого пара. Для уменьшения этого недостатка изобретатель предложил применять паровой золосдуватель, устанавливаемый в центре перегревателя. Золосдуватель состоял из трубки, в которой по всей ее длине просверлены отверстия. Оси отверстий наклонены к выходу газов. Это сделано для облегчения уноса в дымовую трубу сдуваемой золы.

Другим недостатком перегревателя является трудность замены поврежденной трубки, так как для ее удаления приходится вынимать весь пучок. В этом отношении лучшую конструкцию представляет второй перегреватель Шмидта[1] (рис. 284). Стрелками показан путь пара в перегревателе. В нем трубки перегревателя распределяются по дымогарным трубкам. Последние делаются большего диаметра

[1] Русск. пат., № 26903, 1905 г.
Mombe. Die Entwicklung des deutschen Seeschiffsmaschinenbaues. VDI. Стр. 1074—1079, 1914.

(100—150 *мм*). В данном перегревателе представляется возможным удалять поврежденный элемент трубы, оставляя в покое остальные трубки.

Но зато этот перегреватель в сравнении с кустовым имеет новый недостаток. При загрязнении перегревателя падает не только температура перегретого пара, но и нагрузка котла. Чтобы уменьшить этот недостаток, часть дымогарных трубок оставляли свободной от труб

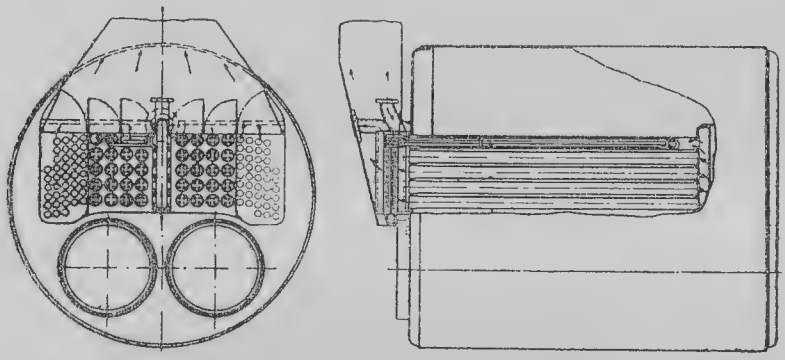


Рис. 284. Пароперегреватель Шмидта, располагаемый в дымогарных трубках.

перегревателя. Свободные дымогарные трубки располагались либо по бокам, как показано на рис. 284, либо в одной половине котла.

Меньшую вероятность понижения паропроизводительности котла из-за заноса трубок золой представляют котлы с перегревателями системы Пилока.

190. Пароперегреватель системы Пилока (Pielock)

Пароперегреватель системы Пилока размещался в водяном пространстве котла (рис. 285). Состоял он из большого числа щелевых коробок, которые пронизывались дымогарными трубками. Влаж-

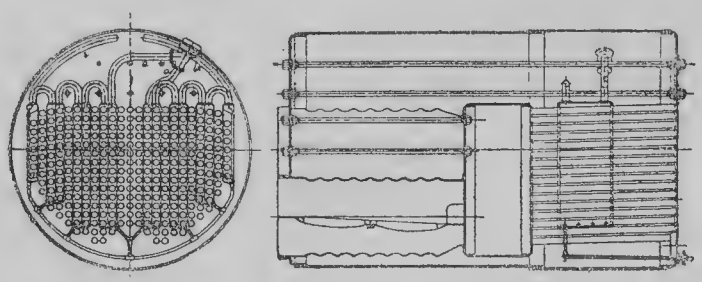


Рис. 285. Пароперегреватель Пилок.

ный пар из котла поступал в боковые коробки, проходил в них сверху вниз, затем огибал направляющий щит и поднимался вверх. Далее пар переходил в соседние коробки, где также опускался вниз и поднимался вверх и т. д. Все коробки выполнялись из тонкой листовой стали без анкерных связей. Разность давлений в пароперегревателе и котле была незначительна. Для продувания пароперегревателя дно каждой коробки сообщалось через отростки со спускной трубочкой.

Выгодная особенность этого перегревателя — возможность размещения его в наивыгоднейшем участке перепада температур. Поверхность нагрева пароперегревателя могла быть уменьшена до минимума.

Такой перегреватель позволял производить в нем перегрев пара до 350°. Его поверхность нагрева составляла примерно 30—40% от общей поверхности нагрева котла. Эти преимущества оказались значительно ниже тех недостатков, которыми обладал перегреватель: 1) часть теплоты пара, воспринятая от газов, передавалась воде через коробки перегревателя, что затрудняло получение высокого перегрева пара; 2) щелевые коробки, поверхность которых со щитками была почти равна поверхности перегревателя, увеличивали его вес; 3) пред-

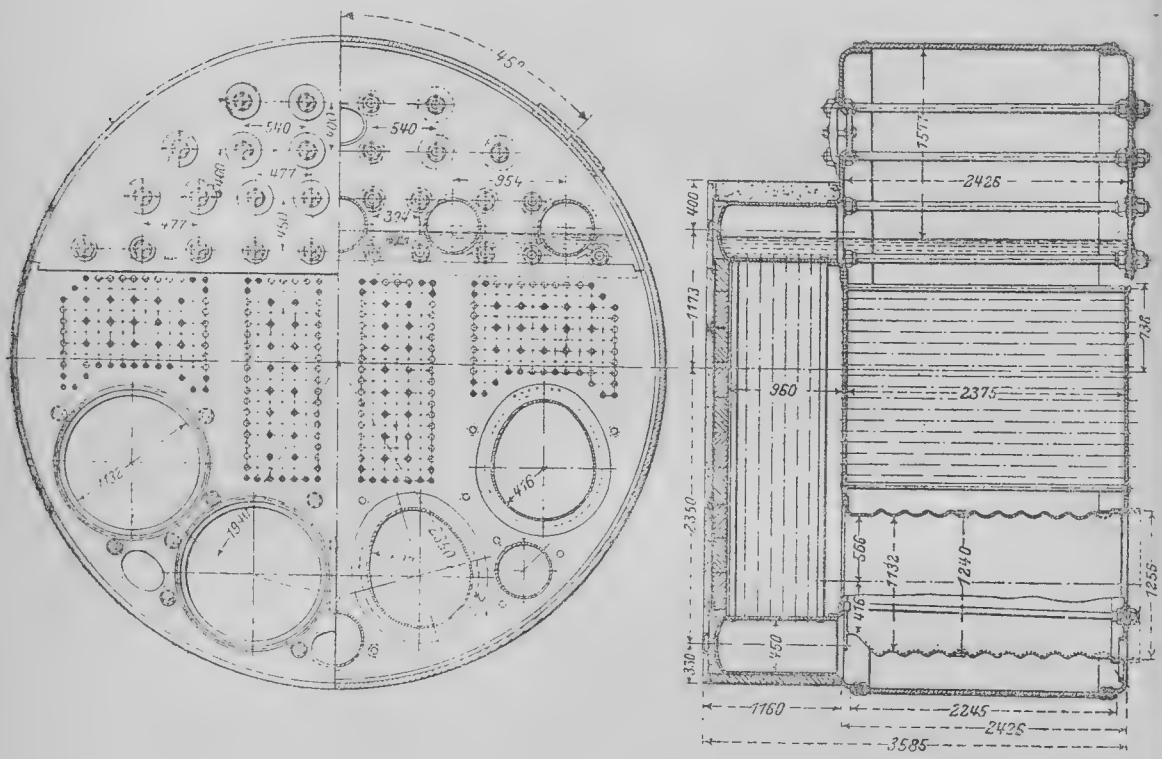


Рис. 286. Котел Прюдон-Капюса.

ставлялась большая трудность осмотра, очистки и замены трубок, проходящих через коробки перегревателя.

Перечисленные недостатки изобретения Пилока явились основной причиной ограниченного применения перегревателя данной системы.

191. Котлы Прюдон-Капюса

Наибольший успех в повышении к. п. д. получила фирма Прюдон-Капюса[1]. Она усовершенствовала ранее строившиеся смешанные котлы типа Солиани, у которых поверхности нагрева состояли из дымогарных и кипятильных трубок (рис. 286 и 286а). Котлы Прюдон-Капюса

[1] Водный транспорт, № 2, стр. 34—36, 1932.

строились для давления 10—20 *ати* и часто снабжались пароперегревателями.

Смешанные котлы позволяли значительно повысить удельную паропроизводительность котла за счет улучшения циркуляции воды. Усиление циркуляции в данном котле объяснялось интенсивным подъемом пароводяной смеси в кипятильных трубках и одновременным усилением опускания воды, поступающей в нижние коллекторы в цилиндрическом корпусе котла.

В табл. 93 даны основные характеристики, а в табл. 95 — данные испытаний котла Прюдон-Капюса.

Опыты проводились техническим институтом Марсельского университета. Из всех данных таблиц обращают на себя внимание высокие к. п. д. котельной установки и паронапряжение поверхности нагрева котла.

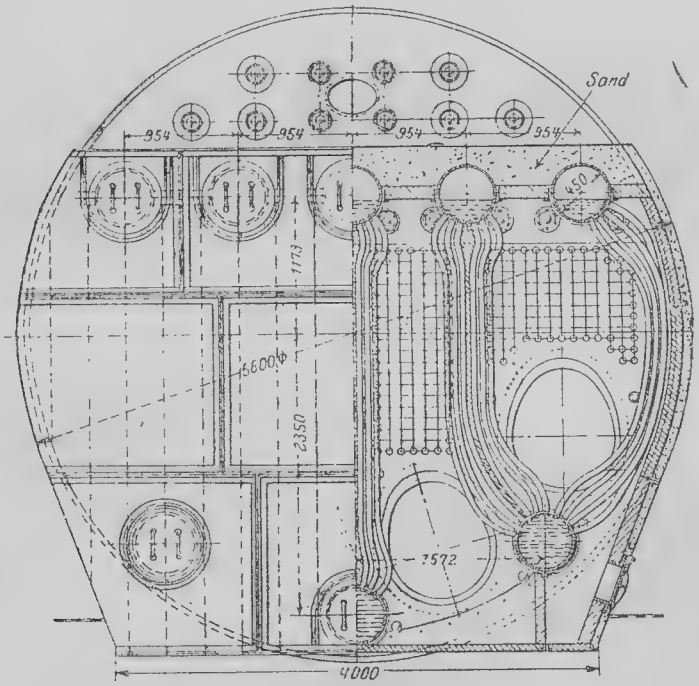


Рис. 286а. Котел Прюдон-Капюса.

Первое применение котлов Прюдон-Капюса относится к 1912 г., когда пять данных котлов были поставлены на пароходе «Британия» мощностью 5500 *и. л. с.* Каждый котел имел поверхность нагрева 300 $м^2$. В 1914 г. было установлено девять котлов ($H_к = 237$ $м^2$ каждый) на пароходе «Петрия» мощностью 10 000 *и. л. с.*

Вследствие империалистической войны постройка котлов Прюдон-Капюса прекращается почти на 10 лет и потом возобновляется. За период с 1923 по 1933 г. только в одной Франции было выстроено свыше 100 пароходов, оборудованных котлами Прюдон-Капюса. Так, например, показанный на рис. 286 котел был установлен на пароходе «Alle de France»[1] мощностью 53 000 *и. л. с.*, который был снабжен

[1] WRH, стр. 453, 1927.

Таблица 93

№ по пор.	Наименование	Размерность	Характеристика котла и топлива
1	Внутренний диаметр корпуса котла	*мм*	5333
2	Наружная длина корпуса котла	»	3818
3	Расстояние между трубными досками	»	2500
4	Число топок		4
5	Внутренний диаметр топок	*мм*	1130
6	Суммарная площадь колосниковой решетки	$м^2$	7,57
7	Суммарная поверхность нагрева котла	»	357,3
8	Объем воды	$м^3$	28,52
9	Рабочее давление	*ати*	15
10	Дутье Гоудена	—	—
11	Подогреватель расположен в дымовой коробке	—	—
12	Топливо-мазут, теплотворная способность низшая	*кал/кг*	9960
13	Углерод на сухую массу	%	8,53
14	Водород » » »	%	13,0
15	Сера » » »	%	0,96
16	Кислород и азот на сухую массу	%	75
17	Объем, занимаемый котлом	$м^3$	86
18	Объем, занимаемый котлом, отнесенный к 1 $м^2$ пов. нагр.	$м^3/м^2$	0,241
19	Объем, занимаемый котлом, отнесенный к 1 *т* пара	$м^3/т$	5,65

24 котлами данной системы, из которых 12 было двойных и 12 ординарных. В котлах сжигалось 2,5 *кг* нефти на 1 $м^2$ поверхности нагрева в час $\left(\frac{B}{H_к}\right)$. Растопка при естественной тяге производилась в три часа, а при искусственной в 2 часа. $P_к = 12—13$ *ати* и макси-

Таблица 94

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Шотландский двухтопочный котел	Трехтопочный котел Прюдон-Капюса	Экономия котла Прюдон-Капюса в сравнении с шотландскими
1	Рабочее давление	$P_к$	*ати*	12	12	—
2	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	178,8	175	—
3	Вес котла с кладкой без арматуры, гарнитуры и дымовой коробки	$G_к$	*кг*	33000	20000	15%
4	Вес котла на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{G_к}{H_к}$	$кг/м^2$	181	160	12%
5	Диаметр котла	$d_к$	*мм*	4270	4110	—
6	Длина	$l_к$	»	3202	3143	—
7	Габаритный объем	$v_к$	$м^3$	58,4	51,0	12,5%
8	То же на 1 $м^2$ поверхн. нагрева	$\frac{V_к}{H_к}$	$м^3/м^2$	0,33	0,29	12,1%

Таблица 95

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов			
				1	2	3	4
1	Время испытания в 1924 г.			29/IV	6/V	12/V	26/V
2	Продолжительн. испыт.	Z	час	8	8	8	8
3	Часовой расход воды	D	*кг/ч*	6368	8989	10750	15180
4	Часовой расход топлива	B	„	418	631	777	107
5	Температура мазута перед форсунками	$t_м$	°Ц	78	78	70	45
6	Паронапряжение пов. нагр. котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	18	25	30	42,5
7	Температура наружного воздуха	$t_{возд}$	°Ц	20	20	21	20
8	Температура подогретого воздуха	$(t_{воз})_{под}$	°Ц	78	78	70	45
9	Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	186	222	239	280
10	Температура газов внизу огневой коробки	$(t_г)^н_к$	°Ц	558	683	734	890
11	Температура газов вверху огневой коробки	$(t_г)^в_к$	°Ц	521	619	648	780
12	Содержание CO_2 в дымовых газах	CO_2	%	12,9	12,7	11,2	13,5
13	Коэфициент избытка воздуха в дымовых газах	α	—	1,20	1,22	1,38	1,15
14	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	15,24	14,24	13,89	13,97
15	Степень сухости пара		%	97	97	97	96
16	Истинная испарительность топлива	$И_{кор}$	*кг/кг*	14,78	13,81	13,42	13,34
	Баланс топлива котельной установки						
17	Передано тепла пару	$\eta_{к.у.}$	%	91,2	89,4	86,8	87,3
18	Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	6,4	7,6	9,5	9,7
19	Потери тепла в окружающую среду и прочие потери	$100-\eta_{к.у}-q_2$	%	2,4	3,0	3,68	3,04
20	Теплотворная способность топлива низшая	$Q^р_н$	*кал/кг*	9960	9960	9960	9960

мально 16 *ати*. $D = 11\,500$. Цилиндрический корпус котла имел $\varnothing = 5{,}6$ *м*, длину $l = 3{,}6$ *м*.

Яркую картину выгодности котлов Прюдон-Капюса может дать табл. 94, сравнивающая основные характеристики данного котла с характеристиками котлов обычных конструкций.

К числу основных недостатков котлов Прюдон-Капюса следует отнести: 1) тяжеловесность и громоздкость их в сравнении с водотрубными котлами; 2) большую продолжительность разводки паров (1—2 часа против 30 мин. у водотрубных котлов); 3) невозможность производить снабжение перегревателя водой во время разводки

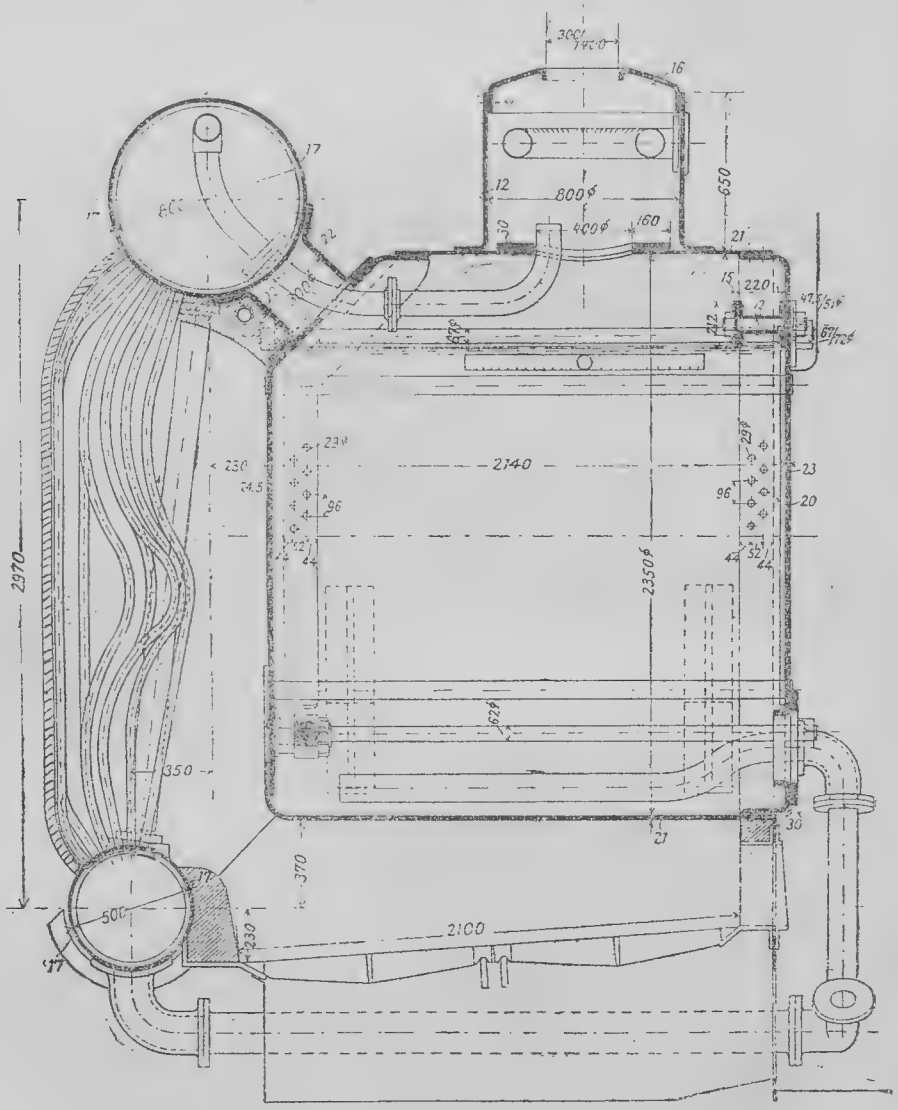


Рис. 287. Котел Шютте.

котла, так как перегреватель в этих котлах располагается петлей вверх.

Однако, все эти недостатки для торгового флота пока незначительны, поэтому котлы Прюдон-Капюса имеют богатую перспективу дальнейшего их применения. Необходимо исследовать возможность их постройки и для судов советского флота.

192. Комбинированные (огневодотрубные) котлы Шютте

Комбинированные котлы типа Прюдон-Капюса не были новостью для начала XX в. На судах комбинированные котлы получили распространение уже в конце XIX в. В процессе эксплоатации выявилась необходимость конструктивных изменений в ряде комбинированных котлов. В результате этих изменений комбинированные котлы XIX в. конструкции Солиани, Штромана и других сменились более совершенными котлами Прюдон-Капюса, Шютте, Ладыженского, Гера и Гоудена.

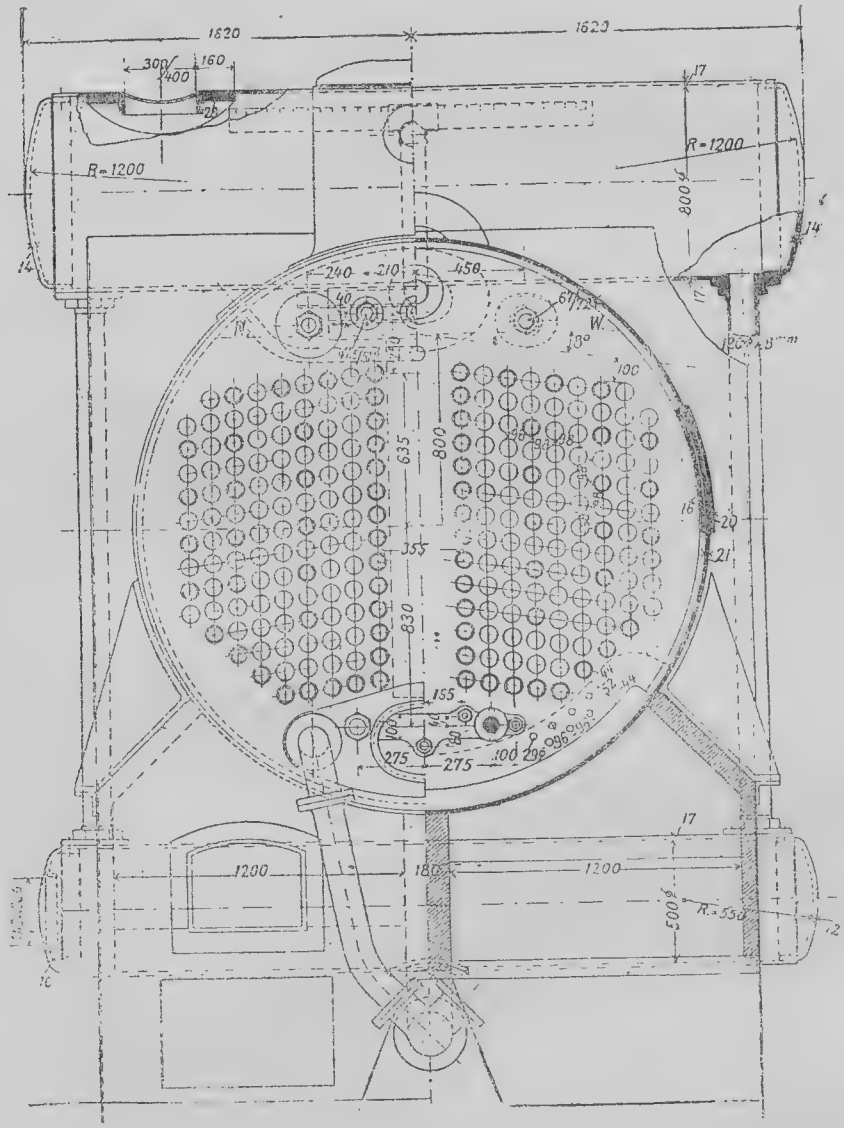


Рис. 287. Котел Шютте.

На рис. 287 показан котел Шютте [1]. Он состоит из двух коллек-

[1] Нем. пат., № 174700, 1904 г. Leps. u. Dietrich. Die Wasserrohrkessel der Kriegs- und Handelsmarine. Rostock, 1904.

торов и цилиндрического корпуса котла с дымогарными трубками. В отличие от других котлов, топки здесь вынесены из цилиндрического корпуса котла и помещены под ним. Это мероприятие позволяет значительно уменьшить напряжение в дымогарных трубках и в корпусе котла.

С котлом Шютте были проведены интересные опыты на скорость разводки паров. Как показывает табл. 96, котел с холодного состояния был включен в работу через 1 час. 15 мин.

Таблица 96

Дата испытания	28 января 1901 г.	
Температура воды в котле	17°	
Подожгли топливо в топке	5 ч. 45 м.	
Начало парообразования	6 „ 09 „	
Давление пара в котле	6 „ 25 „	1 *ати*
„ „ „ „	6 „ 33 „	2 „
„ „ „ „	6 „ 37 „	3 „
„ „ „ „	6 „ 40 „	4 „
„ „ „ „	6 „ 43 „	5 „
„ „ „ „	6 „ 45 „	6 „
„ „ „ „	6 „ 47 „	7 „
„ „ „ „	6 „ 48,5 „	8 „
„ „ „ „	6 „ 50 „	9 „
„ „ „ „	6 „ 51 „	10 „
„ „ „ „	6 „ 52 „	11 „
„ „ „ „	6 „ 53,5 „	12 „
„ „ „ „	6 „ 55 „	13 „
Котел включили в действие	7 „ 00 „	

Данный котел имел поверхность нагрева 143 $м^2$ и площадь колосниковой решетки 3,05 $м^2$.

За время разводки паров в котле было сожжено 628 *кг* угля. Теплотой этого угля (за исключением тепловых потерь) было нагрето 7520 *кг* воды от 17 до 194°, а также прогреты все стенки котла, арматура и трубопровод. В последующие 5 часов было израсходовано 1672 *кг* угля и испарено 13372 *кг* воды. Температура питательной воды была равной 8° Ц. По данным опытов, весовое напряжение решетки было равно 110 $кг/м^2ч$, паронапряжение поверхности нагрева котла составляло 18,7 $кг/м^2ч$, а видимая испарительность топлива $(И_в) = 8$.

В табл. 97 приведены более подробные характеристики котлов этого типа постройки 1901 г. Во втором столбце таблицы для сравнения приведены данные для цилиндрического котла.

По данным таблицы, котлы Шютте легче цилиндрических примерно на 40%. Котлы такого же типа были запатентованы проф. Ладыженским.

193. Котел Ладыженского

В котле Ладыженского (рис. 288) вынесены из корпуса не только огневые коробки, но и топки. По внешнему виду котлы напоминают стационарный котел[1] комбинированного типа. Циркуляция воды в котле Ладыженского может происходить по двум кольцам. Пер-

[1] Проф. В. Л. Сурвилло. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы. 77 стр., М.-Л., 1931.

Таблица 97

№ по пор.	Название судна и тип	Обозначение	Размерность	Яхта „Lensahn“	Колесный пароход
1	Система машин	—	—	3-го расш.	3-го расш.
2	Тип и число котлов	—	—	2 Шютте	1 шотл.
3	Мощность машин	N_i	*и. л. с.*	1068	400
4	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	13	12
5	Поверхность нагрева котлов	$H_к$	$м^2$	304	125
6	Площадь колосниковых решеток . .	R	$м^2$	8,4	3,8
7	Вес одного котла	$G_к$	*кг*	17000	24190
8	Вес одного котла с водой	$G_{к+в}$	*кг*	25000	37190
9	Вес котла в готовом для действия состоянии без дымовой трубы . .	$G_{к.\ у}$	*кг*	29800	40490
10	Весовые характеристики котла . . .	$\frac{G_к}{H_к}$	$кг/м^2$	112	193,5
	„ „ „ . . .	$\frac{G_{к+в}}{H_к}$	„	164	297
11	„ „ „ . . .	$\frac{G_{к+в}}{N_i}$	*кг/л. с. ч*	59,6	101
12	Часовой расход топлива	B	*кг/ч*	805	318
13	Весовое напряжение решетки . . .	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2$	96	84
14	Испарено воды в час	D	*кг/ч*	6450	2545
15	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	21,2	20,4
16	Расход топлива на 1 *л. с. ч*	$\frac{B}{N}$	*кг/л. с. ч*	0,754	0,795

вое циркуляционное кольцо находится в самом корпусе котла. Во втором кольце вода проходит следующий путь: цилиндрический корпус котла, два патрубка *i*, соединяющие водяное пространство корпуса с водяными камерами *z*, водяные камеры *z*, две батареи труб (экраны), две водяные камеры, входящие в концы грязевика *k*, грязевик *k*, пучок кипятильных труб *m*, коллектор *l*, трубки *n* и снова цилиндрический корпус котла.

Котел Ладыженского имеет солидную кирпичную обмуровку, что значительно увеличивает его вес. К другим недостаткам котла следует отнести наличие плоскостенного коллектора и, главное, возможность пережога нижней части цилиндрического корпуса котла в случае покрытия его толстым слоем накипи или шлама (в этом котле нижняя часть его подвергается непосредственному действию пламени). И все же рассматриваемый котел в сравнении с шотландскими котлами имеет ряд преимуществ. Котлы Ладыженского установлены на нескольких днепровских пароходах.

194. Котел Гера

На рис. 289 показан котел Гера[1]. Сзади огневой коробки в нем проходит ряд кипятильных труб. Как и в предыдущем котле, циркуляция воды здесь совершается по двум кольцам. Такое устройство котла, помимо уменьшения вредных напряжений в его корпусе, позволило снизить и вес котла. Котел Гера поверхностью нагрева в 87 $м^2$ весит на 3 $т$ меньше, чем равный ему шотландский котел. Можно ожидать, что котлы этого типа получат более широкое распространение.

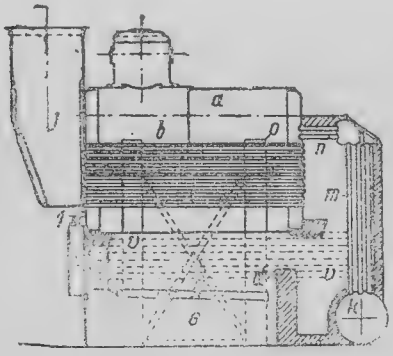


Рис. 288. Котел Ладыженского.

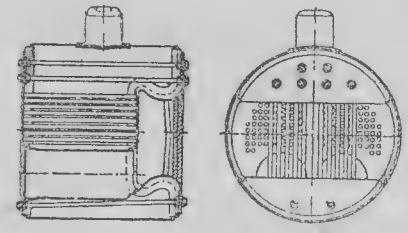


Рис. 289. Котел Гера.

195. Котел Гоудена

Весьма интересная конструкция комбинированного котла разработана и построена Гоуденом и компанией[2]. Котел (рис. 290) состоит из цилиндрического корпуса, батареи кипятильных труб, пароперегревателя и воздухоподогревателя. Нижний коллектор батареи кипятильных труб соединяется с водяным пространством корпуса котла изогнутой трубой. Верхний коллектор батареи соединяется с водяным пространством корпуса котла несколькими трубами, расположенными по всей длине коллектора. Паровые пространства коллекторов в топке соединяются между собой трубой. Питательная вода поступает в верхний коллектор кипятильного пучка по трубке C. Путь воды по кипятильным трубкам и в корпусе котла на рис. 290 обозначен стрелками.

На уровне верхнего коллектора установлены две заслонки *A* и *B*. Последними можно регулировать температуру перегретого пара. При очень высокой температуре перегретого пара уменьшают количество газов, протекающих через пароперегреватель. Для этой цели прикрывают заслонку *A* и приоткрывают заслонку *B*, пропускающую газы мимо пароперегревателя. Температуру подогрева воздуха можно регулировать изменением количества газа, пропускаемого мимо воздухоподогревателя.

Рассматриваемые котлы могут отапливаться либо мазутом, либо углем. На рис. 290 показан котел, приспособленный под угольное отопление. Котел снабжен пятью цепными механическими решетками.

[1] VDI. Стр. 476, 1928; WRH. Стр. 203, 1928.

[2] Англ. пат., № 240546, 240547, 1924 г. Shipbuilding and shipping record, стр. 392—99, 1925.

196. Новейшая котельная установка Гоудена — Джонсона

В последние годы фирма Гоудена[1] разработала более совершенную и экономичную установку. Ей удалось сконструировать огнетрубный котел для производства пара давлением в 20 *ати* и температурой перегрева в 400° Ц (рис. 291). Газовая коробка в рассматриваемом

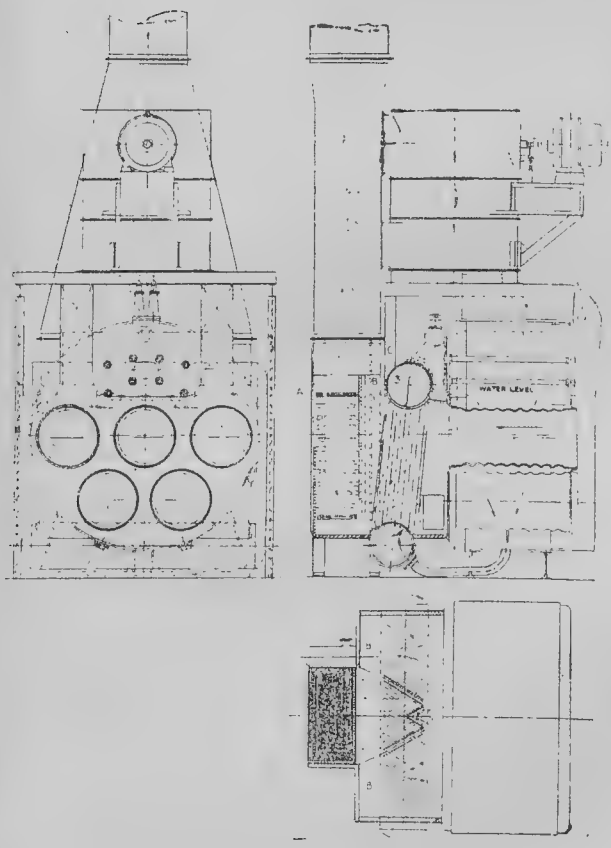


Рис. 290. Котел Гоудена.

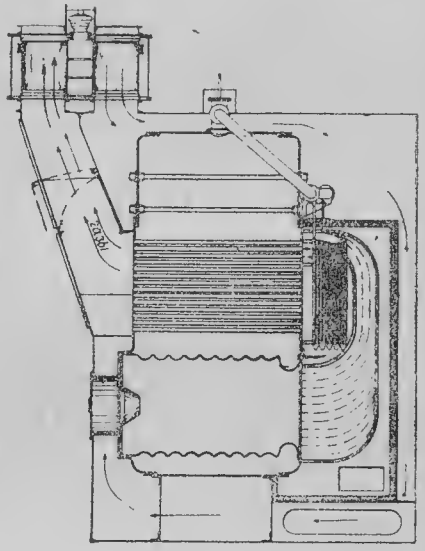


Рис. 291. Новейшая конструкция котла Гоудена.

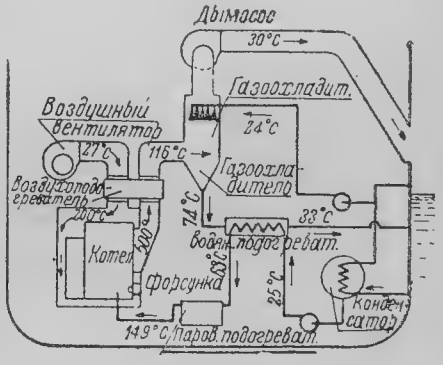


Рис. 292. Схема котельной установки Гоудена — Джонсона.

котле вынесена из его корпуса. Для усиления циркуляции воды и для интенсивного охлаждения газов в газовой коробке установлены два ряда кипятильных труб, соединяющих верхнюю и нижнюю части водяного пространства котла.

Пароперегреватель в котле подвешен перед задней трубной доской. Это позволяет значительно уменьшить его поверхность нагрева. Одновременно уменьшилась опасность появления течи в задней труб-

[1] Chipbuilder and marine engine builder. Стр. 37—38, 1933. Использование тепла дымовых газов по системе Гоудена. Первый судовой котел Гоудена—Джонсона. Shipbuilder, № 299, стр. 65—67, 1935.

ной доске. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду весь котел заключен в кожух. Пространство в кожухе разделено горизонтальными щитами на две части. Воздух, подогретый в подогревателе Юнгстрема, поступает в кожух и омывает сначала верхнюю часть котла и, наконец, направляется к нефтяным форсункам. Воздух в подогревателе и в кожухе нагревается до 200° Ц. Для удаления золы в газовой коробке предусмотрен лаз.

В данной установке представляется возможным повысить к. п. д. котла до 88%. Позднее фирма разработала новый оригинальный проект котельной установки, по которому к. п. д. ее, подсчитанный по низшей теплотворной способности, может быть доведен до 100% и выше.

Такой высокий к. п. д. фирма предполагала достигнуть за счет уменьшения почти до нуля тепловых потерь с уходящими газами и за счет использования теплоты испарения водяных паров, уходящих в дымовую трубу.

Эта установка имеет лишь два дополнительных элемента: 1) газоохладитель и 2) водяной подогреватель питательной воды.

Путь движения воды, воздуха и газов на рис. 292 обозначен стрелками. Дымовые газы, пройдя воздухоподогреватель и охладившись там до 116°, поступают в газоохладитель. Здесь они охлаждаются забортной водой до 30°. Вода нагревается в газоохладителе с 24 до 74°. Из газоохладителя вода направляется в водяной подогреватель, где понижает свою температуру до 33°.

Уходящие газы просасываются вентилятором через газоохладитель и сепаратор, где от них отделяется влага. После этого осушенные газы выбрасываются за борт. Из-за низкой температуры уходящих газов дымовая труба не нужна.

В данной установке представляется возможным довести к. п. д., считая по высшей теплотворной способности топлива, до 95%. Если же подсчитывать к. п. д. по низшей теплотворной способности, то его можно повысить до 100% и выше в зависимости от сорта сжигаемого топлива (табл. 98).

Таблица 98

№ по порядку	Наименование	Обозначения	Размерность	Топливо		
				Дрова хвойные	Каменный уголь Донбасск. П. С.	Мазут
1	Теплотворная способность топлива высшая	$Q_в^р$	*кал/кг*	3380	7405	10535
2	Теплотворная способность топлива низшая	$Q_н^р$	„	2480	7185	9870
3	К. п. д. котла, подсчитанный по $Q_в^р$	η	%	95	95	95
4	К. п. д. котла, подсчитанный по $Q_н^р$	η	%	129	98	101

В 1935 г. котлы Гоуден — Джонсона были установлены на товаропассажирском лайнере «Crispin». Ниже приведены основные характеристики котла:

Поверхность нагрева	$H_к$	$= 255\ м^2$
Давление пара в котле	$P_к$	$= 20\ ати$
Температура перегретого пара . . .	$t_{пер}$	$= 400°$.

По данным фирмы котел получился на 35% легче и на 25% дешевле, чем шотландский котел одинаковой паропроизводительности.

Исходя из характеристик котла, можно надеяться, что котлы Гоудена — Джонсона получат широкое распространение на судах коммерческого флота.

Для представления об отдельных количественных и качественных характеристиках военных флотов и котлов, применяемых в них, приводим табл. 99 и 100.

Данные таблицы показывают, что в военных флотах получили наибольшее применение водотрубные котлы. Суммарная мощность водотрубных котлов на судах военного флота составляет около 97,8%, и только 2,2% мощности военных судов мира дают огнетрубные котлы.

Одновременно данные таблицы указывают, что в начале XX в. во флотах каждой страны (кроме Франции) более 90% мощности кораблей обеспечивают 3—4 системы котлов.

Из всех данных этой таблицы обращают на себя внимание сведения об английском крейсере «Hood», мощность механизмов которого равна 157 тыс. *л. с.* Мощность данного крейсера превышает более, чем в шесть раз, мощность самого крупного в мире в конце XIX в. английского крейсера «Terrible» постройки 1895 г. Мощность механизмов крейсера «Terrible» была равна 25 тыс. *л. с.*, а наибольшая скорость хода — 22 узлам.

ВЫВОДЫ

1. Начиная примерно с 1900 г., резко усилилась подготовка военных флотов к империалистическим войнам.

2. Наряду с другими мероприятиями проводилась упорная работа по усовершенствованию судовых паросиловых установок, в основном по линии дальнейшего увеличения быстроходности и радиуса плавания судов, а также повышения к. п. д. и мощности паросиловых установок.

3. Для увеличения быстроходности и радиуса плавания судов котлостроительные заводы вели упорную работу по уменьшению веса котлов.

Наиболее эффективные средства для удовлетворения этих требований:

а) переход к применению при постройке котлов трубок малого диаметра,

б) замена угольного отопления чисто нефтяным и смешанным отоплением,

в) увеличение паропроизводительности котлов путем увеличения поверхности нагрева котла и повышения ее паронапряжения.

4. Число систем водотрубных котлов, устанавливаемых на военных судах в 1900—1920 гг. в сравнении с последними 20 годами XIX в. сократилось приблизительно в четыре раза.

Таблица 100

Основные характеристики отдельных классов кораблей постройки 1903—1920 гг. [1]

№ по пор.	Наименование корабля	Класс корабля	Год постройки	Водоизмещение в тоннах	Скорость в узлах	Мощность механизмов в *л. с.*	Система турбин	Система котлов	Количество котлов	Отопление котлов	Запас топлива в *т*	Радиус плавания в милях	Примечание
1	АНГЛИЯ „Queen Elisabeth“	Линкор	1913	31 100	25	75 000	Парсонс	B и W	24	н.	650 / 3400	4400	Кипятильные трубки крупнокалиберные
2	„Hood“	Лин. крейсер	1918	46 200	32	157 000	Броун Куртис (зубч. пер.)	Ярроу	24	„	1200 / 4000	6556 / 12	Кипятильные трубки мелкокалиберные
3	„Furious“	Авианосец	1916	23 200	31	90 820	То же	„	18	„	4025	3200	
4	„Despatch“ . . .	Крейсер	1919	4 850	29	40 000	То же	„	6	„	300 / 1050	2300 / 1400 (28)	Кипятильные трубки мелкокалиберные
5	„Bruce“	Лидер	1918	1 555	36,5	40 000	Парсонс (зуб. пер.)	„	—	„	401 / 504		
6	„Wakeful“ . . .	Эсминец	1917	1 100	34	30 000	B. C. зуб. пер.	„	3	„	322 / 368	2500,0 / 1000 (36)	
1	США „Maryland“ . . .	Линкор	1920	33 120	21,1	36 167	G. E. эл. прив.	B и W	8	„	2500 / 4000	12000 / (15)	
2	„Langley“ . . .	Авианосец	1912	12 900	15	7 152	G. E. эл. прив.	двойн. шотл.	3	„	2300		
3	„Omaha“	Легкий крейсер	1920	7 620	34,9	94 290	Вестингауз, Парсонс	Ярроу	12	„	10000 / (15) / 7200 (20)	2000	Суммарная пов. нагр. котлов $H_к$=8400 $м^2$
4	„Bailey“	Эсминец	1920	1 330	35	26 000	Парсонс или К.	Норм. или Ярроу	4	„	300	5000	
1	ФРАНЦИЯ „Bretagne“ . . .	Линкор	1913	22 189	21,1	29 000	Парсонс	Никлосс	24	см.	2700 у. + 300 н.	4700 (10) 2800(18,7)	
2	„Bearne“	Авианосец	1920	25 000	21,5	40 000 (из них 15000 *л.с.* поршн. маш.)	Турб. и поршнев. маш.	Дю-Тампля—Нормана	12	н.	2100	6000 (10) 1000 (17)	Кипятильные трубки котлов мелкокалиберные
3	„Strassbourg“ . .	Крейсер	1914	5 600	27,3	3 600	Турб. герм. морск. типа	Шульц—Торникрофта	14	см.	1170 у. + 430 н.	4466 (11) 918(25,5)	

[1] В девятом столбце: н.—нефтяное, см.—смешанное, у.—угольное отопление. В десятом столбце: у. — уголь, н.— нефть.
В одиннадцатом столбце дальность плавания указана при наибольшем запасе топлива. Цифра в скобках показывает, к какой скорости хода в узлах относится соответствующая дальность плавания.

Продолжение табл. 100

№ по порядку	Наименование корабля	Класс корабля	Год постройки	Водоизмещение в тоннах	Скорость в узлах	Мощность механизмов в л. с.	Система турбин	Система котлов	Количество котлов	Отопление котлов	Запас топлива в *т*	Радиус плавания в милях	Примечание
4	„Admiral Senes" .	Лидер эсм.	1917	1 525 2 110	34	44 000	турб.	Шихау морского типа	4	н.	210/720	2500/(20)	
5	„Intrepide" . . .	Эсминец	1911	1 180	27	24 000	турб.	Шульц–Торникрофт	3	„	280	3000 (15)	
	ЯПОНИЯ												
1	„Ise"	Линкор	1916	29 900	23	45 000	Броун Куртис	Консей типа Ярроу	24	см.	4000 у. + 1000 н.		Котлы Konsey японск. адмир. тип котлов (изм. Японией котлы Ярроу)
2	„Kuma"	Крейсер	1919	5 600	33	90 000	Парсонс или Керт.	Катр.	12	10 к. н. 2 к. см.	350/1500	8500,0/(10)	
3	„Tanikaze" . . .	Эсм. I кл.	1918	1 180	34	34 000	Парсонс	Консей типа Ярроу	4	н.	315		
4	„Momo"	Эсм. II кл.	1916	848	31,5	16 600	Керт.	„	4	см.	92 у. + + 212 н.		
	ИТАЛИЯ												
1	„Duilio"	Линкор	1913	23 000	21	34 000	Парсонс	Ярроу	20	„	1450 у. + 850 н.	4000 (10)/2600 (19)	Кипятильные трубки мелкокалиберные
2	„Brindisi" . . .	Крейсер	1912	35 000	27	25 600	AEG	„	16	у.	750	1600 (24) 860 (27)	
3	„Falco"	Лидер	1919	1 733	36,5	39 800	Този турб.	Торникрофт	5	н.	120/160	1700 (15)/380 (36)	
4	„Palestro"	Эсминец	1919	1 076	32.4	22 000	Zoelly	„	4	„	170		
	ГЕРМАНИЯ												
1	„Hannover" . . .	Линкор	1905	13 200	18	17 000	Поршн. маш. 3-цил.	Шульц–Торникрофт	12	см.	1750 у. 200 н.	5900 (10)	
2	„Berlin"	Крейсер	1903	3 650	22	10 000	Поршн. маш. 3-цил.	То же	10	у.	400/860	5900 (10)	
3	T. 196	Эсминец	1911	800	27,5	18 200	Парсонс	„ „	4	н.	204		

5. На судах военного флота широкое распространение получали лишь те водотрубные котлы, которые лучше других удовлетворяли следующим основным требованиям:

а) приспособление котлов к нефтяному отоплению,

б) повышение давления пара,

в) возможность увеличения форсировки работы котла.

6. Котлостроительные заводы стремились перенести в выпускаемые ими судовые котлы лучшие конструктивные качества других котлов, которые уже хорошо зарекомендовали себя на практике. Эта тенденция котлостроительных заводов приводила к унификации водотрубных котлов. Постепенно стирались грани различия отдельных систем водотрубных котлов.

7. В 1900—1920 гг. проводилась большая работа по усовершенствованию комбинированных котлов. Появились котлы Прюдон-Капюса, Гоудена, Гера и др.

8. Последние в сравнении с шотландскими котлами имеют следующие преимущества:

а) меньшие термические напряжения в корпусе котла. В комбинированных котлах огневая коробка вынесена из корпуса котла;

б) высокий к. п. д. — у котлов Прюдон-Капюса и Гоудена $\eta_к = 90—80\%$ против 60% у шотландских котлов;

в) экономия в весе и габаритных размерах у котлов Прюдон-Капюса составляла примерно 15—12% в сравнении с шотландскими котлами;

г) лучшие условия циркуляции воды в котле благодаря наличию пучков кипятильных трубок. Последние способствуют выравниванию температур воды в котле, особенно во время разводки котла.

9. Другим крупным усовершенствованием огнетрубных котлов в период 1900—1920 гг. можно считать успешное снабжение их пароперегревателями.

10. В процессе опытной и эксплоатационной проверки работы перегревателей выработались следующие типы их:

а) перегреватели расположенные в дымовой коробке,

б) кустовые перегреватели,

в) перегреватели, расположенные в дымогарных трубках,

г) перегреватели, расположенные в водяном пространстве котла.

Из всех этих перегревателей наиболее практичными следует считать два последних типа перегревателей при условии, если они снабжены надежно работающими золосдувателями.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К VI ГЛАВЕ

1. Dückhoff H. u. Buchholz H. Berechnen and Entwerfen d. Schiffskessel. Berlin, 1910.

2. Seaton A. E. A manual of marine engineering. 20 ed., London, 1928.

3. Traill T. W. Boilers, marine and land, their construction and strength. 5 ed. London. 1920.

4. Stromeyer C. E. Marine boilers, management and construction. 6 ed. London, 1924.

5. Bauer G. Berechnung und Konstruktion d. Schiffsmaschinen und Kessel Berlin, 1927.

6. Robertson L. Marine boilers, their construction and working. London, 1916.

7. Mentz W. Schiffskessel. Handbuch für Konstruktion und Berechnung. Berlin — München, 1907.

8. Cordier F. Chaudières et condenseurs. Paris, 1927.

9. Turin André. La chaufferie moderne, les foyers des chaudières, leurs constructions, leurs accessions, leurs services. Paris, 1913.

10. Welsh S. Die Maschinen der Flüssfeuerzänge und der kleinen Seeschiffe, deren Kessel und Hilfsmaschinen. Berlin, 1923.

11. Leps u. Dietrich. Die Wasserrohrkessel der Kriegs- und Handelsmarine. Rostock, 1904.
12. Münzinger F. Berechnung und Verhalten von Wasserrohrkesseln. Berlin, 1929.
13. Müller. Die Schiffsmaschine, ihre Konstruktionprinzipien, Anordnung und Bedienung. Ein Handbuch für Schiffsingenieure und Offiziere der Handelsmarine. Braunschweig, 1908 г.
14. Fairburn W. A. The water-tube boilers in the American mercantile marine. „Trans. Nav. Arch. a. Mar. Eng-rs" (N.-Y.), v. X, 1902.
15. Hutton W. S. Steam boiler construction. A practical handbook for engineers, boilermakers and steam-users. London, 1921.

Русская литература к VI главе

1. Домашнев Д. М. Паровые котлы. Курс Инж. Морск. Учил. СПБ, 1910.
2. Погодин. Курс пароходной механики. Ч. I. Паровые котлы. 1912.
3. Кошевой Б. В. Паровые котлы. Курс морского корпуса. СПБ, 1914.
4. Голов. О современных механизмах военных судов. СПБ, 1911.
5. Титов П. И. Судовые механизмы. М.-Л., 1933.
6. Сурвилло. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы, М.-Л. 1931.
7. Голов. Паровые котлы современных военных судов. „Известия по механической части флота", вып. V, ч. II. СПБ, 1913.
8. Поморский. Учебник для кочегаров флота. Москва, 1931.
9. Вельш З. Паровые котлы и машины и главнейшие устройства речных судов. Перев. с нем. с дополнениями инж. Бычкова, М.-Л., 1933.
10. Винтер В. Описание механизмов экскадренного миноносца „Новик". Кронштадт, 1914.
11. Шак. Теплопередача в промышленных установках. Л.-М., 1933.
12. Людвиг. Справочная книга судового механика. М.-Л., 1935.

Журнальные статьи

1. Водный транспорт, № 2, 1932. Макаренко А. Судовые паровые котлы ускоренной циркуляции.

Статьи из иностранных журналов

1. Die Wärme, № 28, стр. 458—459, 1934. Hochleistungs-Flammrohrkessel (Einzugkessel).
2. Archiv für Wärmewirtschaft. № 10, стр. 265—266, 1933. Stiller E. Schiffskessel ohne Anker und Stehbolzen.
3. Shipbuilder, № 273, стр. 37—38, 1933. The Howden-Johnson heat recovery system.
4. Shipbuilder. № 299, стр. 65 — 67, 1935. The first Howden-Johnson boiler. Howden Johnson Boiler System. Mar. Eng. & Motor Ship. Bldr., v. 56, № 665, p. 47 — 49, 1933.
5. VDI. Стр. 1074—1079, 1914. Momber. Die Entwicklung des deutschen Seeschiffs — maschinenbaues (Doppelender, Zylinderkessel für den Dampfer „München". Wasserrohrkessel für das Linienschiff „Markgraf". Wasserrohrkessel des Kreuzers „Regensbourg").
6. Marine engineer and Motorshb. June, 1929. Marine boilers, combined fire-tube - water-tube boilers.
7. TINA, Vol. 54, 1912. Yarrow H. E. Results of experiments with a water-tube boiler, with special reference to super-heating.
8. Boiler maker, V. 22, № 12, стр. 344 — 345, 1927. Combined firetube and watertube boiler.
9. Eng. a. boiler house rev. V. 45, № 9, Mar., стр. 588 — 589, 1932. Gander. J. S. Problem of superheat with Scotch boilers.
10. Jahrbuch Schiffbautechnische Gesellschaft, стр. 221—264, дискуссия, стр. 265 — 274, 1907. Mehlis M. Die Dampfüberhitzung und ihre Verwendung im Schiffsbetriebe Vorgetragen. Charlottenburg (Diskussion, стр. 265 — 274).
11. Gander T. S. Problem of superheat with Scotch Boilers. Eng. and Boiler House Rev. V. 45, № 9. Mar. p. 588 — 589, 1932.

ГЛАВА VII

МЕХАНИЧЕСКИЕ ТОПКИ

197. Общий ход развития механических топок

Ручные топки имеют много преимуществ, как-то: редкий, несложный и недорогой ремонт, надежность работы и простота их обслуживания. Но, как правило, к. п. д. ручных топок весьма низок, так как в периоды загрузок угля в топку через топочные дверцы врывается холодный воздух. Последнего бывает в 3—4 раза больше теоретически необходимого количества воздуха для горения топлива во время загрузки угля.

Избыточный воздух проходит транзитом через котел и уходит в дымовую трубу, нагретым примерно до 400°. Увеличение избытка воздуха в периоды загрузок влечет за собой увеличение тепловых потерь с уходящими газами и понижает к. п. д. котла. Периодическое поступание в топку холодного воздуха вызывает колебание температуры стенок топки и котла, в результате чего отдельные части котла подвергаются вредным термическим напряжениям и сравнительно быстро изнашиваются.

Но наиболее важным недостатком ручных топок является трудность поддержания бездымного горения. Для уменьшения этих недостатков еще с конца XIX в. угольное отопление начали заменять нефтяным. Одновременно проводилась большая работа по замене колосниковых решеток, обслуживаемых вручную, механическими топками [1].

Еще в 1785 г. изобретатель паровой машины Джемс Уатт запатентовал шахтную топку с наклонной решеткой. Такое устройство топки позволяло получать в ней бездымное горение. Топка Джемса Уатта является прототипом широко распространенных в настоящее время шахтных топок. Данные топки используются в Советском Союзе для сжигания дров и торфа.

В 1819 г. Томас Брунтон (Англия) сконструировал механическую топку, состоящую из круглого вращающегося диска. Топка Брунтона получила некоторое применение в промышленности, но была вскоре забыта из-за высокой стоимости и технических неполадок при ее работе.

В 1838 г. Джукс (Jukes) (Англия) изобрел топку с нижней подачей топлива. В 1841 г. тот же Джукс сконструировал цепную решетку (рис. 293). Надо заметить, что принципиальная схема устройства цепных решеток осталась без изменения до наших дней.

---

[1] Немировский И. А. и Пьянов П. В. Механизация сжигания топлив на морских судах. М.-Л., 1932.

Первая наклонно-переталкивающая топка была запатентована Холлем (Holl) в Англии в 1845 г. В 1867 г. топки такого же типа вводятся Викарсом (Vicars) на заводах Англии, а в 1878 г. Морфи (Morphy) в Америке. В 1844 г. Фрисби (Friesby) в Америке сконструировал первую топку с нижней подачей.

Вторая топка с нижней подачей была сконструирована в Америке Джонсом в 1889 г. Эта топка с некоторыми изменениями применяется с успехом в настоящее время.

На судах механические топки[1] начали вводить с 1884 г. Пионером в области применения механических топок во флоте был пароход «State of Nevadau», на котором в 1884 г. были установлены переталкивающиеся механические топки Hodgkinson'a. Колосники в последних имели возвратно-поступательное движение. Уголь из загрузоч-

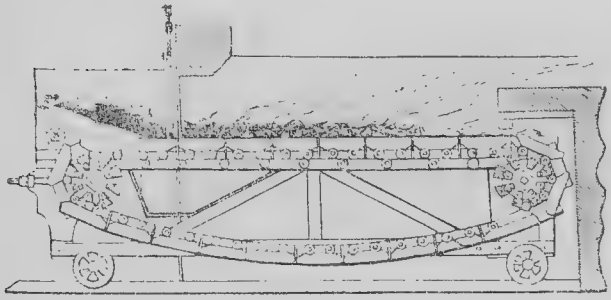


Рис. 293. Цепная решетка Джукса.

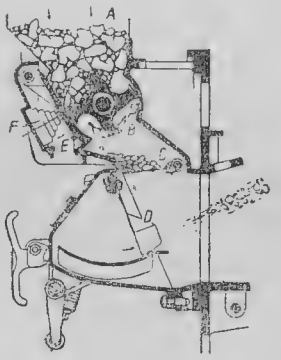


Рис. 293а. Метательная топка.

ного бункера выталкивался на решетку поршнями. Такими же топками в 1894 г. были снабжены котлы на пароходе «City of Chicago». Однако из-за трудности освоения эти топки через 6 месяцев их работы заменили ручными. В 1904 г. на пароходе «Angara» установили механические топки с нижней подачей. В 1906 г. такими же топками с нижней подачей были снабжены пароходы компании Вильсон-Лайн: «Murino», «Calpino», «Torino».

Применение механических топок позволяло облегчить труд кочегаров, которые физически были уже не в состоянии справляться с повышенной нагрузкой топок и ограничивали паропроизводительность котлов. В некоторых установках даже к началу XX в. кочегар с известным искусством должен был забрасывать в топку до 500—600 *кг* угля в час.

Но большого успеха на судах того времени механические топки не имели из-за:

1) несовершенства конструкций топок,

2) недостаточной освоенности эксплоатационным персоналом техники обслуживания их,

3) слабой изученности процессов горения топлива на механических топках,

4) необходимости частых остановок топок на их ремонт.

Стоимость ремонта механических топок, по словам судовых механиков, иногда превышала экономию на топливе, полученную от замены ручных топок механическими. Экономия топлива от замены

[1] Die Wärme, № 42, стр. 689, 1936. Steom Eng. 5, стр. 510, 1936.

ручных топок механическими доходила до 20% от расхода его при ручном отоплении.

Недостатки механических топок и первые неудачи с их применением настолько охладили к ним интерес пароходовладельцев, что вплоть до 1920 г. механические топки почти не находили распространения на судах.

В 1920 г. механическими топками были снабжены голландские пароходы «Бинтеган» и «Парис». Спрос на установки на судах механических топок, в особенности с нижней подачей, значительно увеличился лишь примерно с 1930 г.

После общих замечаний о развитии механических топок перейдем к описанию их конструкций.

198. Метательная топка

Наиболее простой по идее является топка с механической лопатой. Этими топками снабжены германские пароходы «Lettna» и «Hoche» мощностью по 5400 *и. л. с.*[1]. Работа этой так называемой метательной топки схематически может быть представлена так. Уголь для сжигания подается шнековым транспортером в загрузочную воронку *A* (рис. 293 а). Из воронки топливо равными порциями захватывается вращающейся звездочкой и сбрасывается на клапан *C*. Отсюда уголь проваливается вниз и забрасывается в топку качающейся лопатой *D*. Работа звездочки и колебательные движения клапана *C* и лопаты *D* совершаются от одного вала, вращаемого электромотором. От одного электромотора работают все топки котельной[2]. В случае застревания в звездочке крупных кусков угля стенка *E* отходит назад, преодолевая сопротивление пружины *F*, и пропускает очередную порцию угля.

Процесс горения каждой частицы угля в топке можно разделить на четыре стадии: 1) подсушка топлива, 2) выделение и сгорание летучих веществ, 3) горение кокса, 4) выжиг топлива.

Полное выделение влаги из топлива заканчивается при нагреве его до температуры в 150°. Подсушка топлива в топке протекает в благоприятных условиях. Тепло, необходимое для испарения, получается не только за счет тепла, излучаемого факелом, но и за счет теплоты, выделяемой при горении нижележащего топлива.

При дальнейшем нагревании топлива происходит выделение из топлива летучих газообразных веществ, которые воспламеняются в момент их выделения и выхода из поверхности частицы угля. Получается даже представление, что горят как бы не летучие вещества, а непосредственно твердое топливо. Моментальное воспламенение летучих по выходе их из кусков угля объясняется тем, что температура воспламенения летучих несколько ниже температуры, при которой происходит выход летучих из топлива.

В весьма благоприятных условиях находится в топке и зона выделения летучих. Ввиду непрерывного забрасывания топлива выделение и сгорание летучих веществ происходит почти непрерывно. Воздух для горения летучих и кокса расходуется постоянно и примерно в одинаковом количестве.

---

[1] См. также топку Нейля (Neil J.), англ. пат., № 277795, 1926 г.

[2] Hamburg-America line, cargo steamers «Lettna» and «Hochst», Marine Engineer, стр. 12, 1929.

Совсем другое дело при ручной решетке. Благодаря высокой температуре лежащего ниже раскаленного кокса, вновь заброшенное топливо быстро нагревается до температуры выделения летучих. Последнее происходит настолько интенсивно, что для сгорания летучих недостает даже воздуха, в результате чего появляется дымообразование. На ручных решетках рекомендуется сжигать только такие топлива, которые имеют небольшой или замедленный выход летучих. При дальнейшем нагревании твердых остатков топлива начинается горение кокса. Заканчивается горение кусочков угля выжигом находящихся в шлаке горючих веществ. Так как шлак лежит на решетке сравнительно продолжительное время (3—4 часа), то содержащиеся в нем горючие вещества успевают хорошо выжигаться. Наличие в слое небольшой шлаковой подушки полезно. Воздух, поступающий в слой топлива, проходя через шлаковую подушку, нагревается, благодаря чему улучшается процесс горения топлива, лежащего на шлаке. В случае повреждения топки предусмотрена возможность быстрого перехода на ручное обслуживание ее.

По литературным данным, топка этого типа работала вполне удовлетворительно. Ее основные преимущества: 1) небольшой вес, 2) простота устройства, 3) небольшой расход мощности на вращение звездочки и лопат, 4) отсутствие периодического охлаждения стенок котла при забрасывании угля в топку.

Топка имела и ряд недостатков: необходимость производить вручную разравнивание горящего слоя, разрыхление и выгреб шлаков, так как в рассматриваемой топке механизирована лишь загрузка угля. В этом отношении некоторые преимущества имеет переталкивающая топка Бениса [1].

199. Переталкивающая топка Бениса

На рис. 294 показана переталкивающая топка, которая находится в эксплоатации на верфи в Роттердаме (Голландия) с октября 1924 г. [2]. Решетка топки состоит из шести брусков *B*, которые несут на себе колосники. Бруски могут перемещаться по роульсам *C* назад и вперед на 40 *мм*. Бруски получают движение от кулачкового вала *D*, вращаемого электромотором мощностью в 1,5 *л. с.* Вал *D* делает от 4 до 10 об/мин. Движение брусков вперед к порогу происходит одновременно, назад бруски возвращаются попарно, а именно сначала идут *I* и *II*, потом *III* и *IV* и, наконец, *V* и *VI*.

Топливо на решетку поступает через воронку *E*. Толщина слоя топлива, выступающего из воронки, может регулироваться поворотным шибером *G*. Выступы *K* в первом ряду колосников служат для выталкивания топлива из воронки. Под действием возвратно-поступательных движений колосников топливо, выходящее из воронки *E*, перемещается к порогу и постепенно сгорает.

Процесс горения на описываемой решетке несколько отличается от процесса горения на ручных и метательных решетках. Здесь отдельные фазы горения протекают по длине решетки. В фронтовой части, примерно на участке первого ряда колосников, идет подготовка к выделению летучих и горение их и кокса. На четвертом ряду колосников происходит выжиг шлака, а на пятом — скопление шлака.

---

[1] В 1916 г. решетки Бениса были установлены на пароходе «Manchester Hero».
[2] WRH. Стр. 269—270, 1927. См. также англ. пат. № 240233, 1924 г.

Количество воздуха, поступающее в слой, регулируется в соответствии с потребностями в нем для нормального протекания отдельных фаз процесса горения. Наибольшее количество воздуха поступает в слой через второй и третий ряды колосников, там, где происходит горение летучих и кокса.

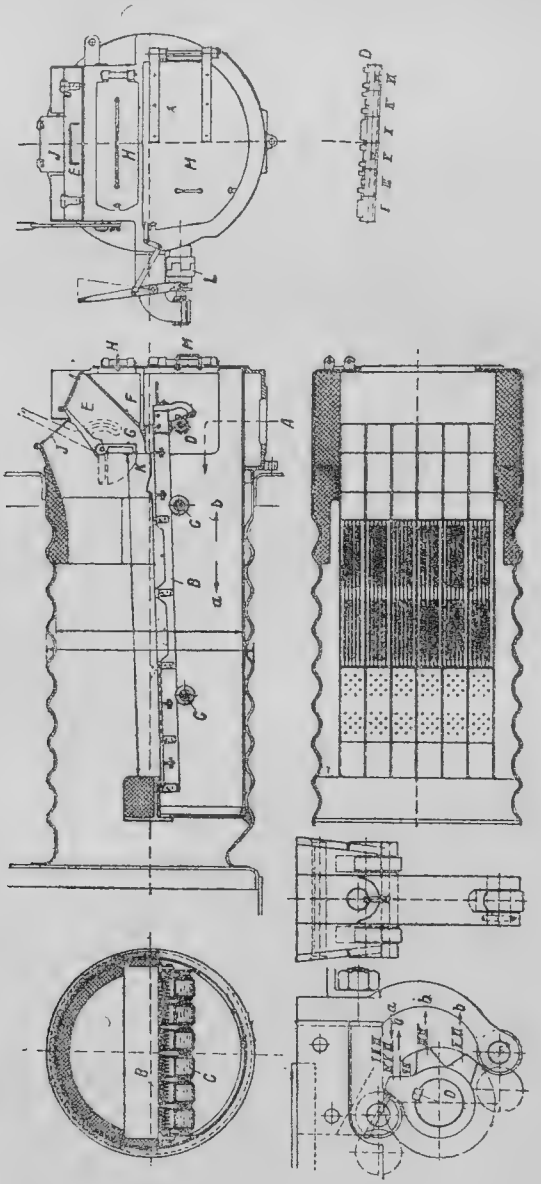


Рис. 294. Переталкивающая топка.

Через четвертый ряд колосников воздух подается в значительно меньшем количестве, так как для выжига шлака его требуется немного. Там же, где происходит подсушка и скопление золы и шлака, живое сечение решетки почти равно нулю, и отдельные колосники не имеют просветов для прохода воздуха.

При правильно сконструированной топке процесс горения на переталкивающей решетке проходит в благоприятных условиях. Перемещение слоя топлива при помощи переталкивания колосников влечет за собой энергичное перемешивание его, что ускоряет зону подсушки и горения летучих и кокса. Под влиянием поступательного движения колосников на поверхность слоя выталкиваются частицы угля, не тронутые горением. Происходит убыстрение их подсушки отчасти за счет теплоты, излучаемой факелом, а отчасти за счет теплопроводности горящих частиц топлива, с которыми они вступили в соприкосновение.

Переталкивающее движение колосников способствует и лучшему выжигу шлака. Шлаковая подушка периодически разрушается под действием движения колосников, что уменьшает число ручных шуровок слоя топлива. Механизация отдельных процессов работы осуществлена здесь больше, чем в метательных топках. Вручную приходится удалять лишь золу и шлак. Для удаления шлака останавливают дутье и открывают топочные дверцы, разъединяя одновременно кулачный вал от мотора. Затем продвигают решетку к фронту и сбрасывают очаговые остатки в зольник.

Разрушение шлаковой коры возвратно-поступательным движением колосников возможно лишь в том случае, если температура плавления золы топлива достаточно высока. В противном случае усилий движущихся колосников бывает недостаточно для разрушения шлака.

Для более полной характеристики мы приводим результаты испытаний данной топки (табл. 101)[1]. Основная характеристика установки: 1) тип котла: двухтопочный шотландский котел, 2) поверхность нагрева котла — 89 $м^2$, 3) площадь колосниковой решетки — 2,4 $м^2$.

Опыты проводились в феврале 1926 г. Государственным институтом экономии топлива в Haage. Таблица указывает на сравнительно низкие значения к. п. д. котла и CO_2 в уходящих газах. По данным опытов, топка не имела больших преимуществ в сравнении с ручными решетками. Даже высокое напряжение решетки было сравнительно небольшим: $\frac{B}{R} = 110$ $кг/м^2$.

Несмотря на наличие благоприятных условий для протекания отдельных фаз процесса горения получение малоудовлетворительных результатов можно объяснить: 1) весьма малыми высотой и объемом топки; 2) небольшим размером отражательных кирпичных сводов; 3) малым шурующим действием колосников: движется одновременно $^1/_3$ решетки, а не отдельные колосники, как в других переталкивающих топках. Это послужило основной причиной ограниченного применения данной топки на судах. Рассматриваемыми топками в 1935 г. были снабжены котлы парохода «Manchester Port». Наибольшее распространение на судах получили и другие конструкции топок данного типа.

Данная топка допускает быстрый переход на ручное отопление в случае повреждения механизма (удалялась лишь плита F, а загрузка топлива производилась через дверцу H). Более полную механизацию обслуживания работы топки возможно получить на цепной решетке.

---

[1] WRH, стр. 270, 1927.

Таблица 101

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Продолжительность опыта	Z	час.	7
2	Топливо—английский уголь	—	—	—
3	Теплотворная способность топлива низкая	$Q_н^р$	*кал/кг*	7230
4	Содержание золы в топливе	$A^р$	%	7,4
5	Содержание влаги в топливе	$W^р$	%	4,0
6	Содержание летучих веществ в топливе	$Л$	%	31
7	Сожжено топлива за опыт	ZB	*кг*	1670
8	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	111
9	Собрано очаговых остатков (зола и шлак)	$ZG_{з+ш}$	*кг*	150
10	Горючих веществ в золе и шлаке . .	—	%	34
	Дымовые газы			
11	Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_в)'_т$	°Ц	17
12	Содержание CO_2 в уходящих газах .	$CO_{2\,ух}$	%	10,3
13	Содержание CO в уходящих газах .	CO	%	0,2
14	Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	325
15	Давление воздуха под решеткой . . .	$+\Delta S_{зол}$	*мм* вод. ст.	+25
16	Разрежение газов в дымовой коробке	$-\Delta S_{д.к}$	*мм* вод. ст.	—11
	Вода и пар			
17	Температура питательной воды . . .	$t'_к$	°Ц	10
18	Испарено воды за опыт	ZD	*кг*	11650
19	Паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	18,7
20	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	7,9
21	Затрачено тепла на образование 1 *кг* пара	Δi	*кал/кг*	653
22	Видимая испарительность топлива . .	$И_в$	*кг/кг*	7
	Тепловой баланс котла			
23	К. п. д. котла	$\eta_к$	%	63
24	Потери тепла с уходящими газами .	q_2	%	21,6
25	Потери тепла от химической неполноты горения	q_3	%	1
26	Потери тепла с золой и шлаком . . .	$(q_4)_{з+ш}$	%	5
27	Потери тепла в окружающую среду .	q_5	%	4,2
28	Потери тепла остальные	—	%	5,2

200. Цепная решетка

На рис. 295 показана цепная решетка [1], установленная под судовым котлом Бабкока и Вилькокса постройки 1910 г. Испытания производились на берегу в Америке. Колосниковая решетка состоит из широкой бесконечной цепи, надетой на два кулачных барабана. Передний барабан вращается от электромотора мощностью в 1,5 *л. с.* и соединен с ним через зубчатую передачу. Передача может быть установлена на несколько скоростей. При максимальной нагрузке топлива решетка движется с наибольшей скоростью, и, наоборот, при минимальной нагрузке решетку пускают по самой малой скорости. Нагрузка может регулироваться также и шибером, поддерживающим желаемую толщину слоя топлива на решетке. Скорость движения решетки и толщина слоя топлива на ней устанавливаются такими, чтобы топливо за время его перемещения до задней стенки могло по возможности полностью сгореть.

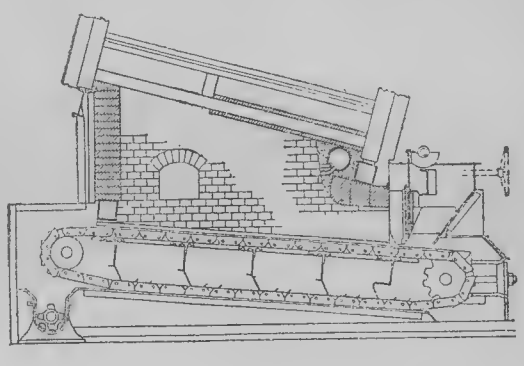


Рис. 295. Цепная решетка.

Работу цепной решетки схематически можно представить так. Свежее топливо поступает из воронки на полотно цепи. Вместе с цепью оно продвигается в глубь топки. По мере продвижения топливо сначала подсушивается, затем нагревается до температуры выделения и сгорания летучих. Наконец, идет горение кокса и выжиг шлака. Образовавшийся на решетке шлак сваливается в конце решетки в жолоб, откуда он удаляется червяком. Все фазы горения несколько перекрывают одна другую; на одном и том же участке решетки может происходить и подсушка, и сгорание летучих, и даже горение кокса. Нормальная работа цепной решетки может протекать лишь при условии установки в топке сводов достаточных размеров. Наличие в топке сводов удорожает ее эксплоатацию. Работа сводов находится в крайне тяжелых термических условиях, что вызывает необходимость производить частый ремонт их.

Кроме того кирпичные своды загромождают топочное пространство и нередко служат причиной образования мертвых, неомываемых проточными газами углов в пучках нагревательных труб. Подсушка топлива на цепной решетке проходит в весьма неблагоприятных условиях.

Верхняя коробка топлива подсушивается лишь по выходе из-под шибера теплотой, излучаемой сводом и факелом. Остальная масса нижележащего топлива прогревается весьма медленно. Прогрев топлива идет за счет теплопроводности, которая у угля близка к теплопроводности теплоизолирующего материала. У топлива с повышенной влажностью выделение влаги занимает на решетке большую зону. Подсушка топлива продолжается даже под коксом, горя-

[1] Transactions of the Soc. of naval arch. and marine eng-rs, стр. 219—248, 1928. Stellman. Forced blast chain grate stoker, tests of marine water tube boiler. См. также Himmelsbach, № 216902, 1923. Duncan № 229184 и 232821 за 1924 г.

Таблица 102

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Дата испытания: 1928 г. июль, сентябрь									
				2/VII	5/VII	6/VII	11/IX	12/IX	28/IX	14/IX	18/IX	25/IX	26/IX	27/IX
1	Продолжительность испытания	Z	час.	6	5	6	5	6	6,5	6	6	6,5	6	6
2	Давление пара в перегревателе	$P_{пе}$	*ати*	13,8	14	13,3	13,2	13,5	13,6	13,7	13,2	13,5	13,5	13,6
3	Температура воды, поступающей в котел	$t_к$	°Ц	97	86,5	94	87	80	87	89	89	83	87	80
4	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	230	241	228	245	235	230	239	238	234	240	228
5	Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_{воз})_т$	°Ц	34	35	32	45	45	43	45	41	46	50	47
6	Температура газов в топке	$t_т$	°Ц	—	—	—	1388	1440	1290	1445	1405	1350	1370	1310
7	Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	241	283	240	291	270	241	273	273	257	275	246
8	Давление воздуха в воздухопроводе	$\Delta S'_{в.п}$	*мм* вод. ст.	61	89	75	90	89	57	75	82	67	80	50
9	Давление газов в топке	$\Delta S_т$	"	3,8	5	4,5	3,5	3,6	2,2	2,5	3,3	1,3	1,5	1,3
10	Анализ газов в конце 1-го газохода	RO_2	%	15,06	14,57	15,1	15,71	15,89	14,22	16,1	15,92	14,13	14,78	13,74
11	" " " " 1-го "	O_2	%	3,25	3,23	4,15	2,43	2,76	4,29	2,20	2,90	4,68	4,15	5,24
12	" " " " 1-го "	CO	%	0,01	0,69	0	0,67	0,13	0	0,08	0,07	0	0	0
13	" " " " 1-го "	N_2	%	81,68	81,51	80,75	81,19	81,22	81,49	81,61	81,4	81,2	81,07	81,02
14	" " " " 3-го "	O_2	%	6,14	5,26	6,1	5,23	5,35	5,61	4,32	5,15	6,17	4,1	5,99
15	" " " " 3-го "	RO_2	%	13,07	13,64	13,25	13,28	13,89	13,04	14,4	13,74	12,9	14,61	13,18
16	" " " " 3-го "	CO	%	0	0,35	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0
17	" " " " 3-го "	N_2	%	80,79	80,65	80,55	81,16	80,76	81,35	81,28	81,11	80,93	81,12	80,83
18	Испарено стандартного пара в час, $\Delta i = 540$ *кал/кг*	D_c	*кг/ч*	5070	8500	5040	7750	6530	4750	6750	6230	6780	8650	5780
19	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_c}{H_к}$	*кг/м²ч*	20,2	34	20	31	26	18,9	27	24,7	27	34,4	23
20	Часовой расход угля	B	*кг/ч*	527	900	528	837	670	501	682	618	613	793	517
21	Влажность угля	W^p	%	8,7	8,7	7,7	11,3	7,3	7,4	7,4	8	4,3	3,2	2,7
22	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	*т·кал/м³ч*	560	1230	735	1150	960	545	980	915	1000	1350	860
23	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	98	167	98	160	124	93	131	122	113	147	96
24	Избыток воздуха	$\alpha''_п$	—	1,18	1,15	1,24	1,128	1,148	1,25	1,12	1,12	1,34	1,24	1,32
25	Видимая испарительность топлива	$H_в$	*кг/кг*	9,63	9,15	9,37	9,27	9,29	9,16	9,58	9,35	10,26	10,0	10,21
26	Стандартная испарительность топлива ($\Delta i_и = 540$ *кал/кг*)	H_c	"	10,53	10,3	10,3	10,42	10,51	10,21	10,7	10,44	11,54	11,31	11,47
27	Расход энергии на обслуживание решетки (включая и транспортер)	N	*л. с.*	—	—	—	0,95	0,91	0,91	0,88	1,04	0,89	0,99	0,88
28	К. п. д. котла перегревателя	$\eta_{к+пе}$	%	78,17	75,28	77,68	76,72	77,23	76,95	78,01	76,62	76,48	76,44	76,38
29	Потери тепла от механической неполноты горения	q_4	%	2,60	1,33	2,33	2,74	3,34	3,81	2,72	2,06	2,71	3,43	3,32
30	Потери тепла в окружающую среду	q_5	%	5,28	7,13	6,21	2,57	4,57	4,54	4,60	5,71	6,24	7,30	6,72
31	Остальные потери	—	%	3,95	16,26	13,78	17,97	14,86	14,7	14,67	15,61	14,57	12,83	13,58
32	Топливо — уголь	—	—	Dundon gas slack								Pocahontas		

	Анализ топлива	Углерод C^c	Водород H^c	Азот N^c	Сера S^c	Кислород O^c	Влага W^p	Летуч. вещ. V	Твердый кокс C	Зола A^c	Сера S^c	Температура плавления золы в °Ц
33	Dundon gas slack	74,47	4,9	1,42	0,66	6,64	7,36	33,85	51,21	1,91	0,66	1427
34	Pocahontas	85,97	4,49	1,24	0,68	1,88	2,41	18,4	75,86	3,79	0,68	1320

щим на поверхности. Для ускорения подсушки топлива применяют обычно два способа: 1) высокий подогрев нижнего дутья, 2) увеличение размера зажигательного свода. Эти мероприятия дают лишь небольшое улучшение. В зону подсушки можно подвести немного горячего воздуха, иначе в топочных газах получится большой избыток его. Иногда, чтобы сократить площадь цепной решетки, занимаемую подсушкой, прибегают к перемешиванию топлива вручную. При перемешивании влажные куски угля подаются на поверхность решетки, где подвергаются интенсивной подсушке. Перемешивание топлива заметно сокращает зону подсушки, но зато уменьшает автоматизм работы решетки.

При неблагоприятных условиях протекает и зона выжига шлака. Образование шлака на цепной решетке, как правило, происходит на поверхности слоя топлива. При сжигании многозольных углей образовавшаяся на поверхности топлива шлаковая подушка будет препятствовать выгоранию топлива, лежащего ниже. Выжиг шлака будет протекать тем хуже, чем больше золы содержит топливо и чем ниже температура плавления золы. Для лучшего выжига шлака иногда прибегают к шуровкам, что опять-таки уменьшает автоматизм работы решеток.

По данным ВТИ сравнительно экономичную работу решетки можно получить в том случае, если топливо будет удовлетворять следующим требованиям:

1) содержание зольности на сухую массу A не более 20%;
2) содержание влаги в угле W^c до 25%;
3) отсутствие сильной спекаемости угля;
4) размер кусков угля не более 75 *мм*. Содержание мелочи (от нуля до 6 *мм*) не должно превышать 20—30%;
5) топливо в слое не должно растрескиваться;
6) температура размягчения золы должна быть не выше 1000—1100° (предел температуры размягчения золы до настоящего времени не выяснен).

Цепные решетки получили в судовых установках весьма ограниченное применение.

Однако, американцы, на основании произведенных ими испытаний сжигания угля на цепной решетке (табл. 102), установленной под судовым водотрубным котлом Бабкока и Вилькокса, сделали иные выводы.

Данные таблицы показывают, что: 1) топка дала небольшой расход энергии на движение цепной решетки (приблизительно 1 *л. с.* на один котел); 2) нагрузку можно было регулировать в широких пределах; 3) удаление очаговых остатков было механизировано; 4) можно было получить 10% экономии в расходе угля в сравнении с ручными решетками.

Все эти выводы не находятся в противоречии с выводами ВТИ, так как топлива, сжигаемые американцами, удовлетворяли поставленным ВТИ требованиям, а воздух в топку подавался подогретым.

201. Топки с нижней подачей

Из всех существующих механических топок наибольшее распространение в судовых установках получили топки с нижней подачей. Первая топка такого типа была изобретена Ваадом (W. R. Waad) в 1898 г. Топки данной системы почти одинакового типа применялись в судовых и стационарных установках.

Для примера разберем наиболее простую топку системы Nycbae & Nissen, построенную для стационарной установки (рис. 296).

Топка состоит из жолоба *R*, в котором вращается червяк *S* от электромотора мощностью в ½ *л. с.* По обе стороны жолоба расположен ряд продольных колосников. Соседние с жолобом колосники имеют сопла для вдувания воздуха в слой топлива, находящийся

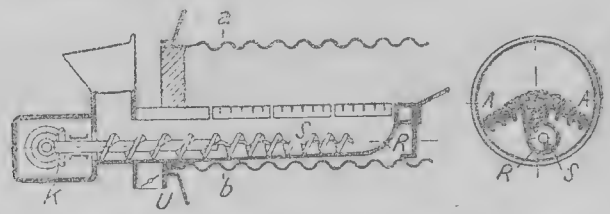


Рис. 296. Одноретортная топка с нижней подачей.

над червяком[1]. Остальные продольные колосники имеют Г-образную форму и установлены в виде лестницы. При вращении червяка топливо из жолоба выталкивается в глубь топки, сваливаясь на боковые решетки.

Расположение отдельных фаз горения угля в топке диаметрально противоположно расположению фаз на метательной и ручной решет-

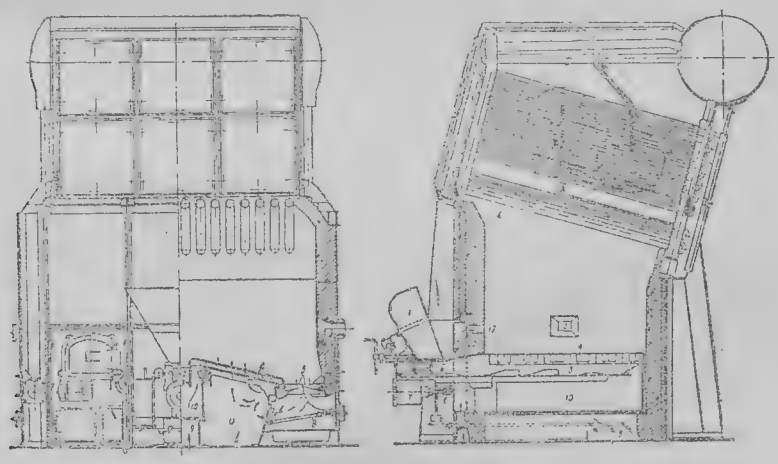


Рис. 297. Одноретортная топка с нижней подачей под котлом B и W.

ках. В наиболее нижних слоях топлива идет подсушка, выделение и сгорание летучих; сверху же слоя идет интенсивное горение и выжиг шлака. Зола и шлак сползают на боковые и задние колосники, откуда периодически удаляются вручную.

Одноретортные топки с нижней подачей были установлены под водотрубными котлами Бабкока и Вилькокса на пароходах «Parigi» и «Bintochan» (Голландия) (рис. 297). В данной топке топливо перемещается по жолобу посредством особого поршня-толкателя[2]. Уголь

[1] Haeder H. Die Dampfkessel. Стр. 40, Wiesbaden, 1923.
См. также англ. пат. № 3368, 1893 г.; № 133568, 1917 г.
[2] Англ. пат. № 175342, 1929 г.; № 2578, 1913 г.; № 143522, 1917 г.

выталкиваемый на боковые решетки, сползает по ним вниз на опрокидные колосники. Колосники боковых решеток получают возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к жолобу. По мере сползания уголь почти полностью сгорает на колосниках *5*.

На колосниках *5* происходит выжиг шлака. Для спуска последнего в камеру *8* требуется лишь повернуть рычагом опрокидные колосники *5*. В данной решетке механизированы почти все процессы обслуживания, включая даже и удаление с решетки шлака. Отдельные фазы процесса горения в топках этого типа протекают так же, как и в предыдущей топке. Площадка *2*, подающая уголь в жолоб, приводится в движение от парового двигателя, который в соответствии с нагрузкой топки может менять число ходов от 1 до 10.

Следовательно, подачу топлива на решетку можно менять в очень широких пределах, что применительно к судовым установкам представляет одно из основных преимуществ топок данного типа. Весьма оригинален здесь способ подвода воздуха в слой топлива. Воздух сначала поступает в камеру *10*, окружающую жолоб *3*. Из камеры *10* воздух частично попадает в слой топлива, лежащий над жолобом *3*. Остальная часть воздуха проходит внутреннюю полость колосников, охлаждая их и нагреваясь сама за счет тепла, отнятого от колосников. Из последних воздух поступает в камеры *11*; из них часть воздуха проходит в слой топлива через просветы колосников *4*, а другая часть поступает в камеру *8* и оттуда направляется через колосники *5* в слой шлака, где и используется для его выжига.

Благодаря такой организации ввода воздуха достигается двойная выгода: с одной стороны, охлаждаются колосники, что увеличивает срок их службы, а с другой стороны — воздух до поступления в слой значительно повышает свою температуру и поэтому способствует более интенсивному горению. Добавочный воздух для горения летучих вводится непосредственно в камеру горения через каналы. Окна *13* служат для наблюдения за процессом горения и состоянием топки.

Рассматриваемые топки были подвергнуты тщательным испытаниям летом 1922 г.[1] Основные результаты испытаний приведены в табл. 103.

Данные опытов указывают на весьма большую надежность работы топки. Редкая котельная установка позволяет провести 190-часовое испытание без вынужденной остановки. Кроме того, по данным испытания котла парохода «Parigi», потери от механической неполноты сгорания (с очаговыми остатками и уносом с золой) были сравнительно небольшие (около 5%). Правда, тепловое напряжение решетки было также умеренное.

На рис. 297a, 297b показана механическая топка с нижней подачей[2], установленная под котлами Бабкока и Вилькокса. С фронта котла топка снабжена топочными дверцами, через которые в случае необходимости можно производить разравнивание слоя топлива. При повреждении механизмов топки, через эти же дверцы можно забрасывать в топку уголь вручную. Наблюдение за процессом горения и разрыхление слоя топлива производится и через боковые окна в кладке.

---

[1] Müller W. I. A few results from practical experience with mechanical stokers applied to marine water tube boilers. TINA. Стр. 310—315 (дискуссия, стр. 315—320), 1923.

[2] Marine Engineer and Mtshb. Стр. 47, 1927.

Таблица 103

		Обозначение	Размерность	Пароход „Bintoehan"	Пароход „Parigi"				
1	Система котлов .	—	—	B и W	B и W				
2	Поверхность нагрева котлов .	$H_к$	$м^2$	202	216				
3	Площ. колосниковой решетки	R	$м^2$	4,8	6,5				
4	Объем топки . .	$V_т$	$м^3$	6,8	11,3				
5	Топливо — уголь	—	—	S. Yorks hard.					
	Анализ топлива:								
6	Твердый кокс .	C^r	%	54,15	59,38	56,54	59,63	59,63	59,63
7	Летучих веществ	V^p	%	31,68	32,91	31,80	30,89	30,89	30,89
8	Влаги	W^p	%	7,34	4,19	6,59	4,24	4,24	4,24
9	Золы	A^p	%	6,65	3,52	5,07	5,24	5,24	5,24
10	Теплотворная способность топлива	$Q_н^p$	*кал/кг*	6915	7540	7510	7350	7350	7350
11	Продолжительность опыта . .	Z	час.	11	16	22	17,5	145	190
12	Сожжено топлива за опыт . .	ZB	*кг*	6730	9200	11300	10200	74500	88000
13	Собрано золы и очаговых остатков за опыт . .	$ZG_{з+оч}$	*кг*	510	677	—	—	6370	7940
14	Весовое напряжение решетки .	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	128	121	79	89	79	71
15	Тепловое напряжение решетки .	$\frac{Q}{R}$	*т · кал/м²ч*	885	913	592	653	581	522
16	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	12,65	12,65	12,25	12,65	12,65	12,65
17	Испарено воды за опыт	ZD	*т/ч*	52,4	78,2	102	92,5	698	832
18	Паронапряжение поверхности нагр. котла . . .	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	23,5	24,2	21,5	24,45	22,3	20,15
19	Видимая испарительность топлива	$H_в$	*кг/кг*	8,45	9,28	10,1	10,13	10,4	10,4
20	Содержание CO_2 в уходящих газах	CO_2	%	11,6	11	11,4	12,2	11,8	12,5
21	Температура уходящих газов . .	$t_{ух}$	°Ц	370	340	270	290	295	283
22	Давление воздуха в воздухопроводе перед топкой	$(\Delta S)_т'$	*мм* вод. ст.	50	50	25	22	25	25
23	К. п. д. котла . .	$\eta_к$	%	64,5	64,8	75,5	73	75	75,7
24	Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	20,7	20,1	15,5	15,4	16,2	14,7
25	Потери тепла от механической неполноты горения и в окружающую среду	$q_4 + 5$	%	14,8	15,1	9	11,6	8,8	9,6

Рассматриваемый котел, представляющий одну из последних моделей котла Бабкока и Вилькокса, был установлен в 1918 г. на голландском пароходе «Патрас». Основные характеристики котла сведены в табл. 104.

По литературным данным, топки этого типа работали вполне удовлетворительно.

Бурное развитие судовых котельных установок за последнее десятилетие объясняется отчасти тем, что теплотехники стали смелее применять на судах последние усовершенствования стационарных установок. Наиболее яркий пример — применение на судах механических топок типа Тейлора [1], которые в стационарных установках давно зарекомендовали себя, как работающие с высоким тепловым напряжением и большим к. п. д.

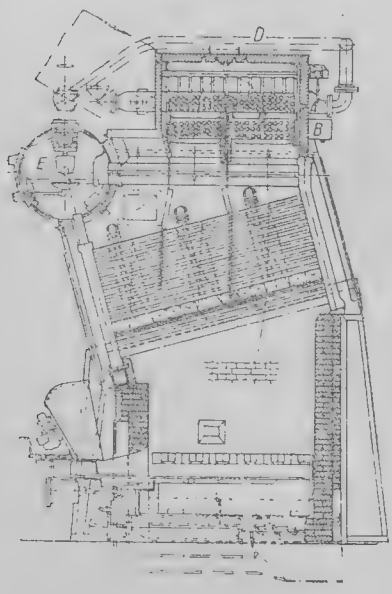


Рис. 297a. Топка с нижней подачей под котлом B и W на пароходе „Потрас".

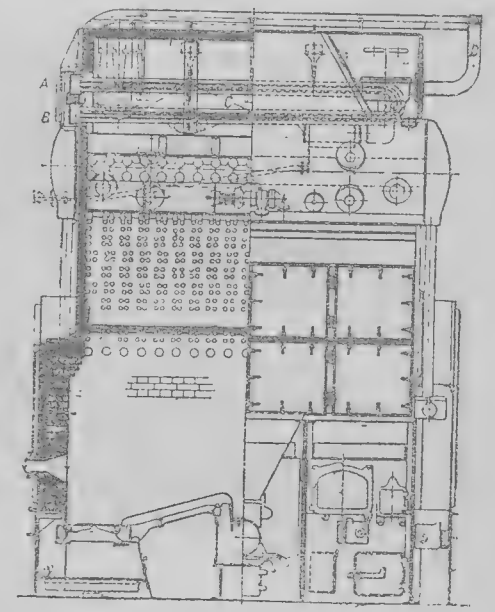


Рис. 297b. Топка с нижней подачей под котлом B и W на пароходе „Потрас".

На рис. 298 показана схема устройства топок типа Тейлора с нижней подачей. Особенностью процесса горения в данной топке является протекание отдельных фаз процесса почти по всей площади решетки. Размещение этих фаз показано на рис. 298. Цифрами обозначены: *1* — частичная подсушка свежего топлива, *2* — зона окончательной подсушки и выделения летучих, *3* — зона горения и *4* — зона выжига шлака.

Работа топки идет так. Уголь из загрузочной воронки подается в каждую реторту посредством толкателей (цилиндрические поршни, делающие около 20 ходов в минуту). Дальнейшее продвижение поданного в реторту угля производится посредством возвратно-поступательного движения колосников. Топливные толкатели и движу-

[1] Англ. пат. № 145458, 1914 г., № 9287, 1914 г.; № 173596, 1920 г.; № 200608, 1922 г., № 308293, 308342, 308345 за 1928 г., № 312770, 1928 г., 314624, 1928 г.

щиеся колосники приводятся в движение от электромотора через общий коленчатый вал. Перемещение угля на решетке производится снизу вверх почти вертикально (на рис. 298 обозначено стрелками). Во время продвижения угля к поверхности происходит выделение из него влаги и летучих веществ. Тепло, затрачиваемое на подсушку топлива и на подготовку его к выделению летучих, заимствуется от горящего сверху слоя кокса.

Таблица 104

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	232
2	Площадь колосниковой решетки . . .	R	„	5,2
3	Диаметр кипятильных труб первого ряда	d	$мм$	102
4	Диаметр кипятильных труб остальных рядов	d	„	46
5	Длина кипятильных труб	l	„	2032
6	Рабочее давление в котле	$P_к$	$ати$	14,5
7	Температура перегретого пара . . .	$t_{пе}$	°Ц	300

Воздух подается в слой топлива через специальные сопла, устроенные в колосниковых пластинах, ограничивающих реторту с обоих боков. По внешнему виду эти колосниковые пластины напоминают собой лестницу.

Летучие вещества, выделяющиеся из нагретого топлива, пронизывают слой горящего кокса, воспламеняются и горят ярким белым пла-

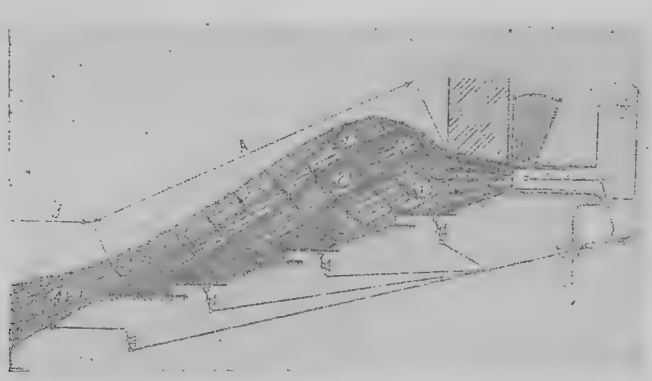


Рис. 298. Схема работы топки с нижней подачей системы Тейлор.

менем. Горящее топливо, под действием движущихся колосников, а также от тяжести своего веса, медленно сползает по решетке вниз и по пути почти полностью сгорает. Зола и часть несгоревших частиц угля образуют шлак, которым покрывается почти вся поверхность горящего кокса. В нормальных условиях работы топки шлак непрерывно разрушается под напором новых порций топлива, поступающих на его поверхность. В процессе разрушения шлака обра-

зуются коврижины, из которых выжигается часть горючих веществ во время медленного сползания их на шлаковые колосники. Шлак сваливается в шлаковый генератор, где в течение 12—24 часов происходит полный выжиг горючих в шлаке. Затем шлак раздробляется специальным дробильным валом и удаляется почти в холодном состоянии (рис. 298а). Потери физической теплоты, уносимой с удаляемым

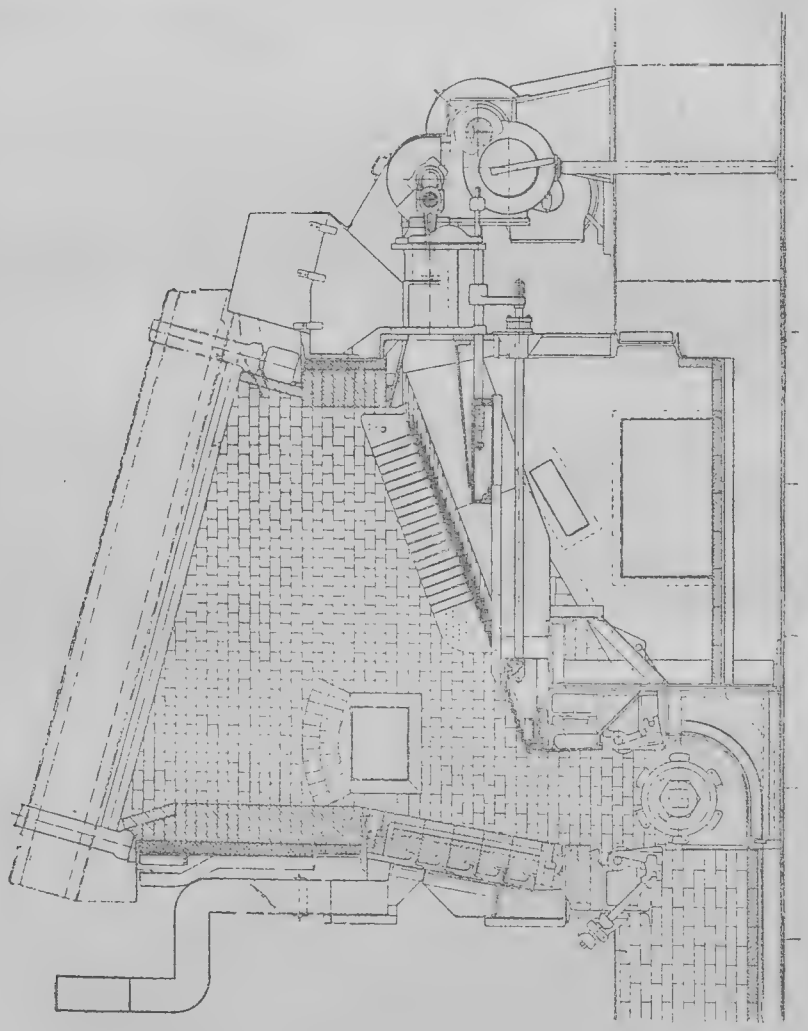


Рис. 298а. Топка с нижней подачей типа Тейлор.

шлаком, практически сводятся к нулю, тогда как в других топках, в зависимости от зольности топлива, они могут доходить до 4%. Расход мощности на работу всей топки, включая и дробильный вал, составляет примерно 1 *л. с.* на 1 *т* сжигаемого топлива. Процесс горения в рассматриваемых топках идет в вертикальном направлении по всей решетке. Это своеобразное протекание процесса горения требует поддержания толстого слоя топлива и применения сильного дутья (до 160—200 *мм* вод. ст.).

Такие условия позволили получать на решетке весьма высокие тепловые напряжения при высоких к. п. д. котла, чего не может дать

никакая другая система топок, включая и ручные. По данным Хаслама, $\frac{Q}{R}$ в топках Тейлора достигает 2000—2500 $т \cdot кал/м^2ч$. Так как в топках с нижней подачей подсушка и подготовка топлива к воспламенению происходят под горящим коксом, то необходимость в устройстве подсушивающих и зажигательных сводов отпадает. Это является выгодной особенностью топок с нижней подачей в сравнении с цепными решетками и переталкивающими топками, в которых наличие сводов для ускорения подсушки и зажигания топлива является обязательным. Выгодность слоевого расположения фаз го-

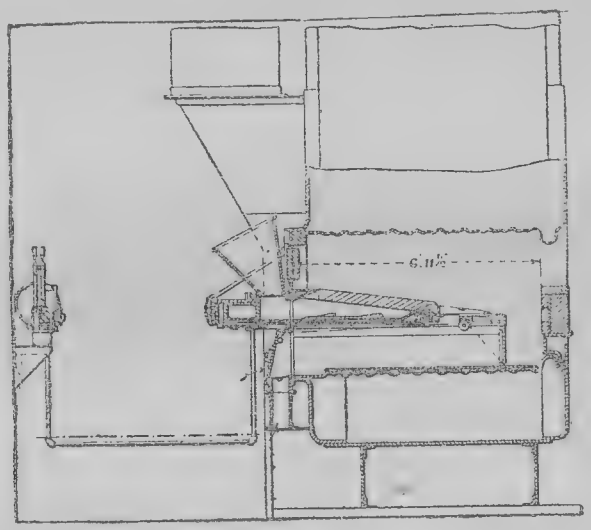


Рис. 298b. Топка с нижней подачей в шотландском котле.

рения заключается и в том, что решетка, будучи покрыта свежим топливом, подвергается меньшим термическим напряжениям и потому меньше изнашивается.

Рассмотренные выше преимущества протекания процесса горения в данной топке обусловили собой появление ряда недостатков. К числу главных из них следует отнести невозможность сжигания в этих топках топлив с большим содержанием золы, имеющей низкую температуру плавления до 1200° Ц. При сжигании таких топлив шлак образует на поверхности плотную массивную кору. Последняя препятствует проникновению летучих и горючих газов, выделяемых в толще слоя. Часто такой массивный слой шлака не разламывается даже под сильным напором выпираемого толкачами топлива. В результате нарушается нормальный процесс горения.

Как показали опытные наблюдения, топки с нижней подачей работали экономично и не уступали другим механическим и даже пылеугольным топкам при условии, если сжигаемое топливо удовлетворяло следующим требованиям:

1) содержание летучих веществ не менее 15—20%,
2) содержание влаги не выше 15%,
3) содержание золы на сухую массу не выше 27%,
4) небольшая спекаемость,
5) температура плавления золы не ниже 1250° Ц.

Последняя цифра в настоящее время окончательно не установлена.

При соблюдении этих условий в топках типа Тейлора представляется возможным полностью механизировать все процессы обслуживания топки, включая и шуровку горящего топлива. При несоблюдении указанных условий иногда приходится применять ручную шуровку. В этом случае глыба топлива может внезапно свалиться в шлаковый генератор, увеличив тем самым потери с механическим недожогом и создав опасность пережога обнаженных колосников. Для устранения этой возможности некоторые топкостроительные заводы уменьшали угол наклона решетки.

Эксплоатационные наблюдения над работой топок типа Тейлора указали на необходимость экранирования топки или, по крайней мере, задней ее стенки. Как пример такого устройства топок, можно указать на заказ фирмы L. M. S. Railways механической топки Sriht Rai для постановки на новый пассажирский пароход под четырьмя водотрубными котлами. Такие же топки были установлены в начале 30-х гг. XX в. на двух из шести пароходов Duke of Lancaster [1]. Механическими топками этого типа снабжены также три канадских парохода типа Бивергиль. Топки с нижней подачей типа Тейлора начинают применять и в шотландских котлах [2] (рис. 298b). Основные преимущества механических топок типа Тейлор коротко можно формулировать так: 1) возможность получения высоких $\eta_к$, 2) возможность работы при высоких нагрузках (тепловые напряжения решеток до 3000000 *кал/м²ч*), 3) возможность получения полной механизации обслуживания решеток, 4) незначительный расход энергии на работу решетки.

Однако, слишком большой вес решетки допускает установку этих топок лишь на тех судах, где экономия в весе котельной установки не будет играть решающей роли в сравнении с другими требованиями (высокий к. п. д. и автоматизм работы топки).

ВЫВОДЫ

1. Ручные колосниковые решетки считались ведущим типом топок вплоть до начала XX в. как в стационарных, так и в судовых установках.

2. Распространение до настоящего времени ручных колосниковых решеток объясняется их большими преимуществами, как-то: редкий, несложный и недорогой ремонт, надежность работы и простота обслуживания.

3. Недостатки ручных решеток: низкий к. п. д., периодическое охлаждение топки воздухом, трудность поддержания бездымного горения и тяжелые условия их обслуживания, в XIX в. были еще терпимы.

4. Лишь к концу XIX в., когда значительно выросли мощность и интенсивность работы котлов, выросло и значение указанных недостатков ручных решеток. Часто физическая выносливость кочегаров ограничивала развитие полной мощности паросиловой установки.

5. Для устранения недостатков ручных решеток в конце XIX и в начале XX вв. велась большая работа по замене ручных топок нефтяными и механическими.

---

[1] Engineering and Boiler House. Июль 1932 г.

[2] Англ. пат., № 237629, 1924 г.

7. Попытки распространения механических топок в судовых установках начались в 1884 г. Но более широкое применение механических топок во флоте началось только в XX в.

8. Основными причинами задержки распространения механических топок на судах следует считать:

а) несовершенство их конструкций и

б) слабую изученность процесса горения.

9. В процессе длительных эксплоатационных и опытных наблюдений выработалось четыре основных группы механических топок:

1) метательные,

2) цепные решетки,

3) переталкивающие топки,

4) топки с нижней подачей.

10. Для судовых котлов наилучшими оказались топки с нижней подачей. При правильно сконструированных топках с нижней подачей можно:

а) механизировать почти все процессы обслуживания топки;

б) поддерживать режим топки с высоким тепловым напряжением при малых избытках воздуха.

11. Механические топки в судовых котельных установках распространялись весьма медленно и получили применение лишь в коммерческом флоте.

12. Основные причины небольшого распространения механических топок:

а) большая тепловая инерция топки,

б) невозможность быстро прекратить огонь,

в) большой вес их,

г) сложность конструкции,

д) необходимость иметь транспортеры и специальный обслуживающий персонал для подачи угля в загрузочные воронки топок.

При сжигании угля в механических топках основные недостатки угольного отопления остались попрежнему в силе.

13. Можно предполагать, что на судах коммерческого флота в ближайшие годы начнется более широкое распространение механических топок с нижней подачей. Последние сравнительно надежны в работе, обеспечивают почти полную механизацию обслуживания их и дают высокие тепловые напряжения решетки.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К VII ГЛАВЕ

1. Bourne John. Treatise of the steam engine in its application to mines, mills, steam navigation and railways. London, 1849.

2. Ortolan A. Code de l'acheteur, du vendeur et du conducteur des machines à vapeur. Paris, 1861.

3. Ortolan A. Traité élémentaire des machines à vapeur marines, rédigé d'après le programme du concours pour le brevet de capitaine au long-cours et de maitre au cabotage. Texte et atlas. Paris, 1857—58.

4. Partington. Ch. F. An historical and descriptive account of the steam engine. London, 1822.

Русская литература к VII главе

1. Ауфгейзер Д. Топливо и его сжигание. М.-Л., 1933.

2. Грановский Р. Г. Котельные установки. М.-Л., 1933.

3. Корницкий С. Я. Работа с механическими топками. М.-Л., 1931.

4. Кочкин Н. А. Материаловедение. Топливо и смазочные вещества. Ленинград, 1933.

5. Гусев С. В. Судовые паровые котлы. Л., 1934.

6. Депп Г. Ф. Паровые котлы. СПБ, 1908.

7. Немировский Н. А. и Пьянов П. В. Механизация сжигания топлива на морских судах. М.-Л., 1932.

8. Нови Ю. О. Сжигание углей и антрацитов на механических топках. Москва, 1930.
9. Окнов М. Г. Топливо и его сжигание. М.-Л., 1934.
10. Сурвилло. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы М.-Л., 1931.
11. Техническая энциклопедия, т. 23, стр. 658—80. Татищев С. В., Топки.
12. Татищев С. В. и Коганович С. А. Механические наклоннопереталкивающие топки, 1933.
13. Хаслам Р. Т. и Руссель Р. П. Топливо и его сжигание. Перев. с англ. М.-Л. — Новосибирск, 1934.

Иностранная журнальная литература

1. Bromley C. H. Mechanical stokers aboard ship. Power. Vol. 51, № 3, стр. 86—89, 1920.
2. Blackburn A. H. Chronological history of stoker development Power. V. 56, № 23, стр. 898—899, декабрь 5, 1922. Дискуссия, № 24, стр. 911—912.
3. Watertube boiler with underfeed stoker for shipboard. Engineering. V. 113, № 2941, стр. 584—586, май 1922.
4. An automatic mechanical stoker for Scotch marine boilers. Marine Engineer & Naval Architect. V. 45, № 540, стр. 340, 1922.
5. Müller W. J. Mechanical stokers for marine watertube boilers. Engineering. V. 116, № 3010, стр. 297—299, 7 сент. 1923. (Результаты испытаний механических топок под морским водотрубным котлом).
6. Mechanical stoking on merchant ships. Mar. engineer & naval architect. V. 46, № 544, стр. 8—11, 1923.
7. Die Wärme, № 26, стр. 442—43, 1932. Kramer R. Vor- und Innenfeuerung.
8. Die Wärme, № 26, стр. 457—58, 1932. Dr. Giesecke. Eine neue Selbstbeschickende und selbstentschlackende Feuerung.
9. Die Wärme, № 6, стр. 92, 1934. То же, Engineering, № 3621, стр. 598—99, 1935. Mechanische Roste für Schiffe.
10. Die Wärme, № 32, стр. 526, 1934. Yarrow-Schiffskessel mit Unterschubfeuerungen. für Eisenbahnfährschiffe.
11. The marine engineer und motorshipb. T. 55, № 662, стр. 387, 1932. Feed-water heater for marine boilers. Pat. Sakic, of 16, Visca ul., Split, Ugoslavia. 30/XII 1931.
12. The marine engineer and motorshipb. Стр. 47—50, 1927. Lentz. Engines, watertube boilers and mechanical stokers. То же, см. Shipb. and Sh. Rec., март 1927, стр. 247—250.
13. The marine engineer and motorshipb. Стр. 139—142, апрель 1931. Taylor. Marine mechanical stoker, liner „Beaverhill".
14. Brenstoff- und Wärmewirtschaft, № 8, стр. 165—180, апр. 1927. Die mechanische Feuerung für Schiffskessel.
15. Stillman T. B. Forced blast chain grate stoker. Tests of marine watertube boiler. Trans. of the Soc. of Naval Arch. and Mar. Engineers, N.-Y., vol 36, стр. 219—248, 1928.
16. Müller W. S. A few results from practical experience with mechanical stokers applied to marine watertube boilers. TiNA. Vol, 65. стр. 310—315, 1923. (Дискуссия, стр. 315—320.)
17. The marine Engineer, Стр. 11—16, 1929. Hamburg — America line cargo steamers „Lettna" and „Hochst".
18. Shipb. and Sh. Rec., стр. 392—400, 2/IV, 1925. Biles J. Relative commercial efficiency of internal combustion and steam engines for high speed passenger vessels.
19. W. R. H. Стр. 269—270, 7/VII 1927. Müller F. Mechanische Feuerung für Schiffskessel.
20. W. R. H. Стр. 279—69, 1927. Maschinenanlage des Dampfers „Patras". То же см. Mar. Eng-r. Стр. 47—50, 1927.
21. Trans. of the institute of marine engineers, № 9, стр. 193—194, 1933. Mechanical stokers for merchant ships.
22. Engineering, № 3621, стр. 598—99, 1935. The Nesfield automatic hydraulic boiler stoker.
23. Engineering. Стр. 453, 20 IV 1934. Stoker fired marine watertube boiler of Yarrow construction.
24. Engineering, № 3576, стр. 88—90, July 1934. Mechanically fired watertube boilers for the s/s „Shuntien".
25. Schiffbau, № 21, стр. 462—463, 1931. Goos E. Die Erfahrungen mit mechanischen Feuerungen für Schiffskessel.
26. Водный транспорт, № 7, 1931; № 1, 1932; № 10, 1934.
27. Engineering. V. 138, № 3576, стр. 88—89, July 27, 1934. Marine watertube boilers with mechanical stokers.
28. Die Wärme, № 42, стр. 689, 17 окт. 1936. Mechanische Roste fur Shiffe.

ГЛАВА VIII

РАЗВИТИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ В СУДОВЫХ УСТАНОВКАХ

202. Общий ход развития пылеугольного отопления

Наряду с попытками заменить ручные топки механическими, теплотехники работали и над вопросом возможности сжигания каменного угля в виде пыли[1]. Основной принцип работы пылеугольных установок заключается в том, что угольная пыль, приготовленная на мельницах, вдувается вентилятором в раскаленную топку и сгорает там. Такой способ сжигания топлива в дальнейшем будем называть камерным.

Процесс горения угольной пыли напоминает собой горение угля на решетке. При сжигании каждой частицы угля можно различить следующие фазы: 1) испарение влаги в топливе, 2) выделение летучих и их воспламенение, 3) горение кокса, 4) выжиг золы и шлака.

Изложенная последовательность протекания фаз в действительности имеет отклонения. На практике всегда имеет место накладывание одних фаз на другие, например частица угля может воспламениться раньше, чем из нее будет выпарена вся влага и т. д.

Процесс горения угля в камере отличается от горения его в слое лишь разницей в скоростях сгорания. При пылеугольном отоплении горение аэропыли, поступающей в топку в данный момент, может продолжаться всего несколько секунд, и, наоборот, сгорание угля в слое продолжается несколько минут.

Такая большая разница в скоростях сгорания угля в слое и в камере объясняется тем, что уголь горит лишь с поверхности, и чем больше будет поверхность единицы веса угля, тем больше скорость сгорания.

Если предположить, что подаваемая в топку угольная пыль будет состоять из кубиков со средней длиной ребра в 0,1 *мм*, тогда поверхность одного кубического сантиметра угольной пыли будет равна 600 *см*^{2}, т. е. в 100 раз больше, чем поверхность одного кубика каменного угля с длиной ребра в 1 *см*.

Вследствие большой скорости сгорания угольной пыли при камерном сжигании угля в топке в каждый данный момент находится весьма небольшое количество как горящего, так и подготавливаемого к горению топлива.

Тепловая инерция при пылеугольном отоплении значительно меньше, чем при слоевом сжигании угля. Это позволяет весьма

[1] Немировский И. А. Пылеугольное отопление на судах. М.-Л., 1932.

быстро производить прекращение горения в топке. Последнее при пылеугольном отоплении производится либо выключением тока при электрическом двигателе, либо закрытием парового клапана при паровом двигателе топливного вентилятора. Как первая, так и вторая операции могут быть произведены не более, чем в 2 секунды, тогда как прекращение горения при слоевом сжигании топлива продолжается несколько минут. Кроме того, последнее требует затраты тяжелого физического труда на выгребание горящего угля с решетки.

Первая попытка сжигания угля в виде пыли была сделана еще в 1818 г. Нейнсом, но она закончилась неудачей. В 1823 г. Н. Колье взял патент на пылеугольную топку. В 1831 г. интересные опыты с пылеугольным отоплением были проведены в Касселе в Германии горным советником Геншелем. Несколько позднее некоторое распространение получили топки Кочбин-Дарбусьера для сжигания угольной мелочи во взвешенном состоянии. Все эти попытки имели мало успеха. Лишь в 1864—1869 гг. удовлетворительные результаты дало испытание пылеугольной топки, проведенное Ижервудом в морском арсенале в Бостоне [1].

Практическое значение топки для угольной пыли приобрели лишь в 1894 г., после опытов, проведенных Герри и Саманом, на американском цементном заводе «Атлас». Опыты были вызваны стремлением построить вполне надежную топку для сжигания угольной пыли вместо ранее употреблявшейся нефти, цены на которую с каждым годом поднимались.

Использовав результаты испытания, заводы «Атлас» в 1895 г. ввели угольное отопление в своих вращающихся топках. Для разработки вполне пригодного в эксплоатации оборудования пылеугольных топок (угольные мельницы, горелки и др.) заводы «Атлас» использовали богатый опыт постройки и эксплоатации пылеугольного оборудования, накопленный в предыдущие десятилетия.

Вслед за заводами «Атлас» на пылеугольное отопление были переведены и другие цементные заводы в США и Европе.

В других отраслях промышленности пылеугольное отопление в США не получило широкого распространения вплоть до 1912—1915 гг.

В годы империалистической войны (1914—1918) пылеугольное отопление начали вводить на железнодорожном транспорте и на металлургических заводах. На последних оборудование для пылеугольного отопления в котельных было настолько усовершенствовано, что сталелитейные заводы безболезненно перешли к применению пылеугольного отопления после того, как военное ведомство США запретило расходовать нефть в промышленности.

Успех применения пылеугольного отопления в стационарных установках и на железнодорожном транспорте побудил пароходовладельцев попробовать применить пылеугольное отопление на судах. Первые опыты с применением его на морских военных судах проводились в США в годы войны (1918—1919). На основании этих опытов окончательные выводы о применении пылеугольного отопления на судах, однако, еще не были сделаны.

---

[1] В 1872 г. Т. Р. Крэмптон сконструировал пудлинговую вращающуюся печь с пылеугольной топкой (dust fuel furnace); топочное и плавильное пространство были разобщены. Эта топка была успешно испытана в начале 70-х гг. для работы стационарных паровых котлов. (*Прим. ред.*).

203. Опыты Бранда и английской фирмы Кларк Чэпмэн и К°

В 1918—1919 гг. Бранд[1] в США оборудовал два цилиндрических огнетрубных котла с пылеугольным отоплением на небольшом судне австралийского военного флота. Пыль приготовлялась на берегу. Из береговых бункеров она подавалась на суда пневматическим способом. В результате проведенных опытов Бранд сделал заключение о необходимости постройки специального котла для пылеугольного отопления.

Дальнейшие опыты сжигания угольной пыли производились английской фирмой Кларк, Чэпмэн и К°[2] в выносной топке такого же цилиндрического котла, с каким проводил опыты Бранд (рис. 299). Кокс для сжигания во время опытов размалывался в индивидуальной

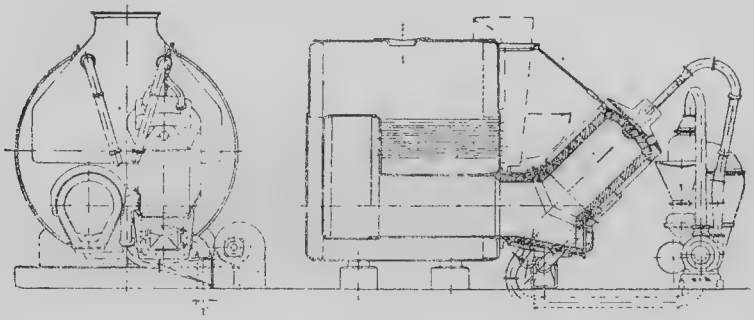


Рис. 299. Пылеугольная установка Брандта.

мельнице. К. п. д. котла составлял примерно 67,4%, а паронапряжение поверхности нагрева равнялось 32,0 *кг/м²ч*.

Более подробные данные об этих испытаниях приведены в табл. 105.

По данным таблицы результаты опытов получились сравнительно хорошие. К. п. д. котла равнялся 67—77% вместо 60% при ручном отоплении. Паронапряжение поверхности нагрева котла доходило до 32 *кг/м²ч*. Небольшим было лишь тепловое напряжение топочного пространства. Одновременно данные опытов указали на необходимость удаления из топки шамотных порогов и решеток. Кроме того, потребовалось устройство горловины с фронта топки для удаления через нее золы. Помимо этого выявилась необходимость отказа от устройства выносных топок, а также и уменьшения степени покрытия поверхности топок (жаровых труб) огнеупорным кирпичом. Во время опытов шамотный кирпич быстро изнашивался от действия высоких температур.

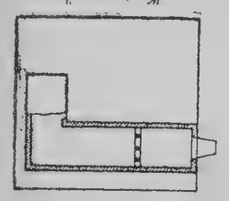
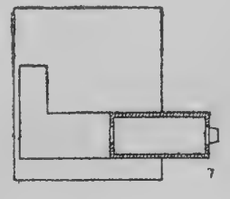
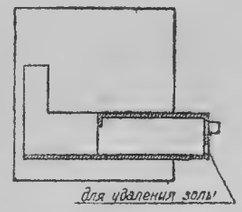
Первая топка для пыли, работавшая в нормальных эксплоатационных условиях, была установлена для опыта на рейнском буксирном пароходе мощностью в 1300 *и. л. с.* Угольная пыль сначала приготовлялась на пароходе, а впоследствии на берегу. Сжигание пыли производилось, как и раньше, в выносной топке цилиндрического котла. Опытные наблюдения показали, что топка быстро изнашивалась от действия высоких температур.

---

[1] Brand. The pulverized fuel for marine purposes. TINA. Стр. 245—274, 1923; Engineer, 144, стр. 75—77, 15/VII 1927; Wärme, 50, № 43, стр. 756—757, 1927. См. также англ. пат., № 303422, 1927 г.; № 144763, 1919 г.

[2] Англ. пат., № 323484, 1928 г.

Таблица 105

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Опыты Бранда		Кларк и Чэпмэн	
				Схема опытных пылеугольных топок, их объем и пов. нагр. котла			
				$H_к = 91{,}7\ м^2$ 	$H_к = 91{,}7\ м^2$ 	$H_к = 63{,}1\ м^2$ $V_{т+газ.к} = 11{,}3\ м^3$ 	$H_к = 63{,}1\ м^2$ см. рис. 299
1	Дата испытания	—	—	18/XII 1918	13/XII 1918	—	—
2	Название судна	—	—	„Sealark"	„Sealark"	—	—
3	Продолжительность испытания	Z	час.	6	2,5	3,5	1,5
4	Сожжено топлива за опыт	ZB	*кг*	635	500 272	855	398
5	Испарено воды за опыт	ZD	»	5100	4210	6270	2640
6	Сожжено топлива в час	B	*кг/ч*	106	309	244	265
7	Испарено воды в час	D	»	855	1700	1790	1770
8	Давление пара в котле	$P_к$	*ата*	2,15	4,92	10,1	9,9
9	Температура питательной воды	$t_к'$	°Ц	—	23	56	55
10	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева	$\frac{D_c}{H_к}$	*кг/м²ч*	10,8	20,9	31,8	31,7
11	Получено стандартного пара в час ($\Delta i_н = 540$ *кал/кг*)	D_c	*кг/ч*	987	1910	2010	2000
12	Температура воздуха в котельной	$(t_в)_{к-й}$	°Ц	43	35	—	—
13	Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_в)'_т$	°Ц	70	72	первичн. 142 вторичн. 288	перв. 121 вт. 375
14	Температура газов в топке	$(t_г)_т$	°	1200	—	138	1575
15	Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	244	238	312	332
16	Давление воздуха	$\Delta S_{возд}$	*мм* вод. ст.	-	20,0	первичн. 75 вторичн. 5	—
17	Мощность машин, работающих от данного котла	N_i	*л. с.*	—	167	165	-
18	Мощность мотора, обслуживающего топку (сила тока)	I	амп.	—	—	—	19,5
19	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	*т · кал/кг*	—	—	127	—
20	Содержание CO_2 в дымовых газах	CO_2	%	14,8	14,6	—	—
				уголь	зола в топке	зола в дымов. короб.	Marwell Victoria	South Clifton NSM		
21	Анализ топлива: теплотворная способность	Q	*кал/кг*	7260	4020	—	3148	6890	5900	5560
22	» » влага	W^p	%	1,98	23,68	0,88	30	2	—	—
23	» » летучих веществ	V	%	33,84	0,64	2,22	22,9	18,64	—	—
24	» » твердого кокса	C	%	57,02	43,46	13,54	40,36	62,84	—	—
25	» » золы	A	%	7	20,23	83,36	6,74	16,52	—	—
26	Сожжено угля от начала разводки до конца опыта	$(ZB)_1$	*кг*		1065		—		—	—
27	Собрано золы и очаговых остатков в топке за то же время	$(ZG_3)_т$	»		106		—		—	—
28	То же в дымовой коробке	$(ZG_3)_{д.к}$	»		110		—		—	—
29	Видимая испарительность топлива	$H_в$	*кг/кг*		8,1		5,27		7,33	6,65
30	Стандартная испарительность топлива ($\Delta i_н = 540$ *кал/кг*)	H_c	»		9,3		6,2		8,25	7,53
31	К. п. д. котла	η	%		69,5		77		67,4	65,2

204. Опыты американского государственного Управления судоходства

Наибольший интерес представляют опыты по пылеугольному отоплению американского государственного Управления судоходства [1]. Ряд предварительных испытаний позволил сделать следующие весьма ценные выводы:

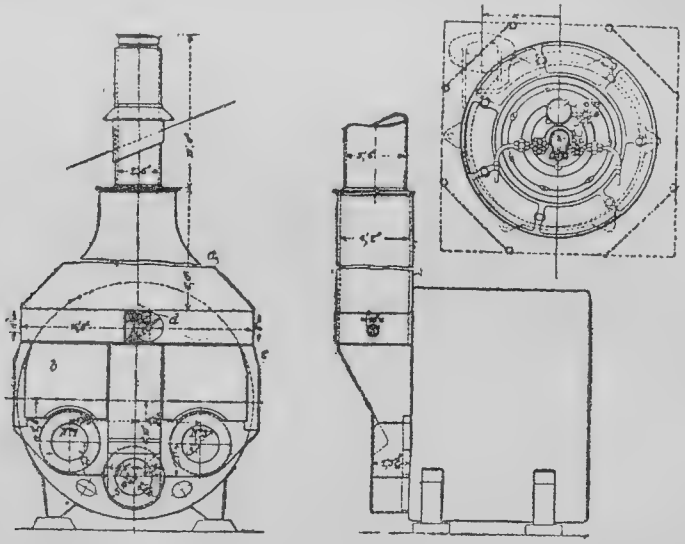


Рис. 299a. Шотландский котел для пылеугольного отопления.

1) приготовление угольной пыли должно производиться на судах,
2) сжигание угольной пыли необходимо производить не в выносной камере, как в предыдущих судовых пылесжигательных установках, а в жаровой трубе.

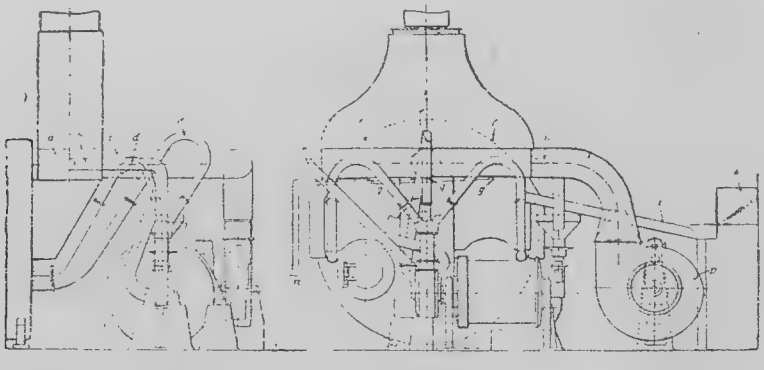


Рис. 299b. Общий вид установки для пылеугольного отопления.

Последний вывод был продиктован также тем, что в стационарных установках уже давно производилось сжигание угольной пыли в экранированных топках.

[1] Jefferson C. F. Test of pulverized coal as applied to Scotch marine boilers. Trans. of the Society of naval architects and marine engineers, стр. 109—125 (дискуссия, стр. 126—136), 1927.

На рис. 299b показан общий вид установки, на которой производились опыты по пылеугольному отоплению американским государственным Управлением судоходства. Установка состояла из шотланд-

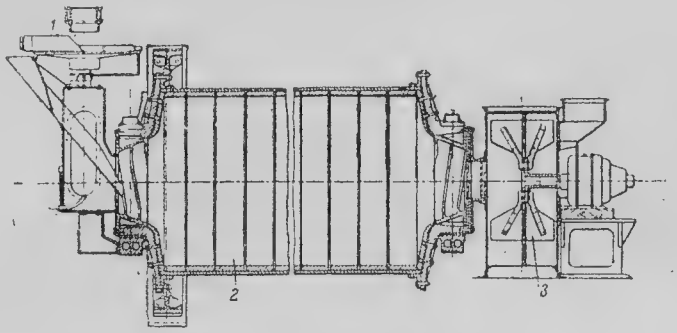


Рис. 300. Мельница Кеннеди.

ского трехтопочного котла (рис. 299а) и угольной мельницы типа Кеннеди.

На рис. 300 показан продольный разрез мельницы Кеннеди. Она состоит из дискового питателя *1*, барабана *2* и вентилятора *3*.

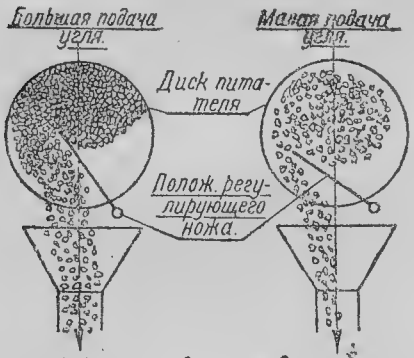


Схема регулирования подачи угля изменением положения отсекат. ножа.

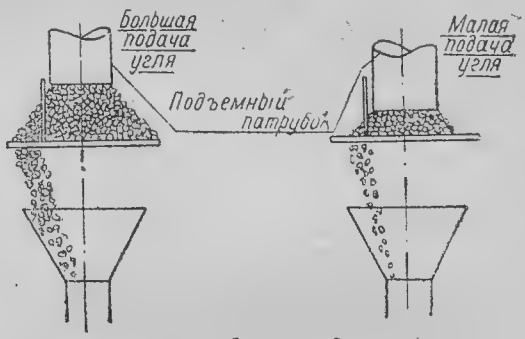


Схема регулирования подачи угля изменением положения подъемн. патрубка.

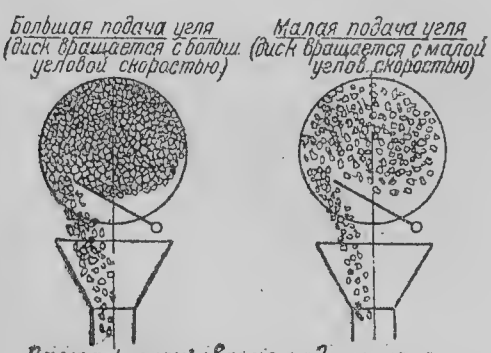


Схема регулирования подачи угля изменением скорости вращения диска.

Рис. 301. Схема регулирования подачи угля изменением скорости вращения диска.

Дисковый питатель представляет собой круглый стол, вращаемый электромоторчиком мощностью ¼ *л. с.* Диск сцеплен с электромотором через червячную передачу, которая уменьшает число оборотов с 1450 до 4—4,5 об/мин. Регулирование количества топлива, поступающего в мельницу, производится либо конусом топлива, устанавливаемым подъемно-спускным патрубком, либо изменением числа оборотов диска питателя или положения отсекательного ножа на диске. На рис. 301 показаны

схемы регулирования количества топлива, поступающего в мельницу. Барабан мельницы выполняется из стальных листов толщиной в 16 *мм*. Изнутри по кольцевой и торцевой поверхности он выкладывается броней, состоящей из волнистых колец и секторов (рис. 302).

Таблица 106[1]

Диаметр шаров	76 *мм*	51 *мм*	31,7 *мм*	Общий вес шаров
Вес шаров, рекомендованный фирмой, в *кг*	1 691,9	1 691,9	5 075,80	8 459,60
В процентах к общ. весу . . .	20	20	60	
Вес шаров, принятый ВТИ в опытах, в *кг*	1 353,5	1 353,5	4 060,64	6 767,64
В процентах к общему весу . .	20	20	60	

Для устранения шума и для смягчения ударов в мельнице кольцевое пространство между барабаном мельницы и броней заполнено пробковым слоем толщиной в 12,7 *мм*. Снаружи для уменьшения тепловых потерь корпус мельницы покрывается слоем войлока и металлическим кожухом.

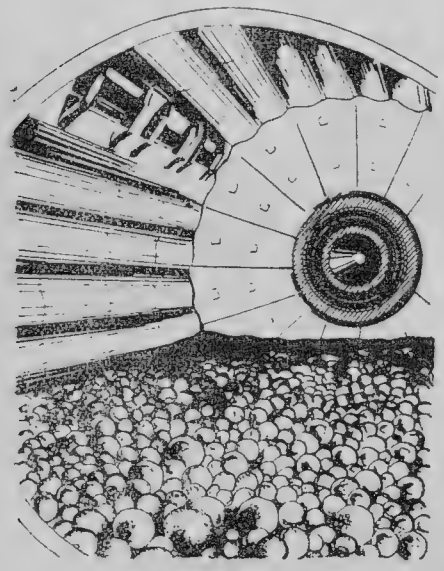


Рис. 302. Мельница Кеннеди, вид изнутри (броня и размалывающие шары).

Размалывающим телом в мельнице являются чугунные или стальные шары. В табл. 106 приведены размеры и вес шаров, рекомендованные фирмой для мельницы производительностью порядка 5—7 *т/час*.

Мельница заполнена на $^1/_3$—$^1/_4$ шарами. Уголь для размола подается в тарелчатый питатель мельницы по патрубку. Барабан мельницы находится в непрерывном вращении со скоростью 20—25 об/мин. При вращении барабана часть шаров поднимается вверх и снова падает на куски угля, разбивая его в порошок (рис. 302а). Часть же угля превращается в порошок за счет трения кусков друг о друга или о шары. Угольная пыль, образовавшаяся в мельнице, отсасывается из нее вентилятором, приводимым в движение электромотором мощностью в 5 *л. с.* и вгоняется им же в топку, где и сгорает. Чтобы облегчить подсушку и размалывание топлива в мельнице, ее во время работы проветривают горячим воздухом или смесью воздуха с топочными газами. Скорость воздуха, прогоняемого через мельницу, подбирается такой, чтобы крупные частицы угля выпадали из воздушного потока. Чем больше будет скорость воздуха в барабане мельницы, тем больше крупных частиц угля будет уноситься с уголь-

[1] Изв. ВТИ., № 2, стр. 167, 1932.

ной пылью в топку, и наоборот. По эксплоатационным данным барабанные мельницы весьма надежны в работе, просты в обслуживании и не требуют частого ремонта. Они хорошо размалывают многозольные и очень влажные угли. Их нередко устанавливают на судах. Но из-за таких недостатков, как: 1) громоздкость, большой вес (около

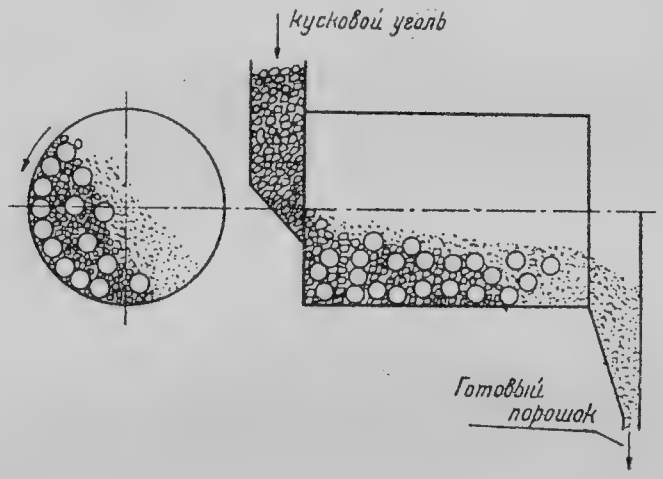


Рис. 302а. Схема работы барабанной мельницы.

4 *т* на 1 *т/ч* помола), 2) большое потребление энергии (15—45 *кв/т п.*), — эти мельницы могут применяться лишь на тех судах, где вес и габаритные размеры играют меньшую роль.

Перейдем к рассмотрению работы пылеугольной установки. Угольная пыль, отсасываемая из мельницы Кеннеди, нагнеталась в три

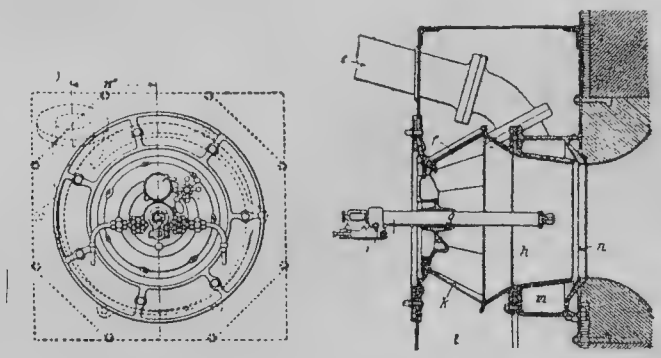


Рис. 303. Горелка системы Пибоди.

топки. Для сжигания пыли в данной установке применялась горелка системы Пибоди [1] (рис. 303). Угольная пыль, взвешенная первичным воздухом, поступала в кольцевую камеру *m* через трубу *e* по касательной плоскости. Пыль получала круговое движение. Вторичный подогретый воздух вводился в топку через специальные завихривающие лопатки. Получив здесь вращательное движение, он подхваты-

[1] Англ. пат., № 256191, 1925 г.

вал выходящую через кольцевую щель п аэропыль и способствовал ее завихриванию. Интенсивное вихреобразное движение угольной пыли — одно из главных условий совершенного устойчивого горения ее в топках. Для зажигания угольной пыли в центре угольной горелки устанавливалась нефтяная форсунка. Горелка Пибоди крепилась в месте топочных дверец жаровой трубы, а не в выносной топке. Жаровая труба покрывалась футеровкой всего лишь на длине 0,7 *м*.

Основные характеристики опытной установки:

Поверхность нагрева котла	238	$м^2$
Поверхность нагрева воздухоподогревателя	59	„
Объем топки	5,6	$м^3$
Объем газовой коробки	7,7	„
Суммарный объем камеры сгорания	13,3	„

В табл. 107 мы приводим выдержку из данных 240-часового опыта, проведенного на судовом котле американского государственного Управления судоходства на строительной верфи в Филадельфии [1].

По данным табл. 107, опыты закончились с большим успехом. К. п. д. котла во время опытов поддерживался в пределах 77—70%, т. е. такими же, как при нефтяном отоплении.

Процесс горения при пылесжигании протекал совершеннее, чем при сжигании угля в слое. Благодаря небольшому избытку воздуха (1,14—1,15) температуры в топке получались порядка 1600 против 1000—1200 при сжигании угля на ручной решетке.

Высокие температуры в топке позволяли увеличить паропроизводительность поверхностей радиации до пяти раз. Одновременно опытные наблюдения показали, что процесс сгорания угольной пыли проходит тем совершеннее, чем меньше тонина помола. При уменьшении тонины помола увеличивается поверхность горения. Последнее способствует ускорению сгорания частиц. Это положение подтверждается теоретическими и опытными данными (рис. 304).

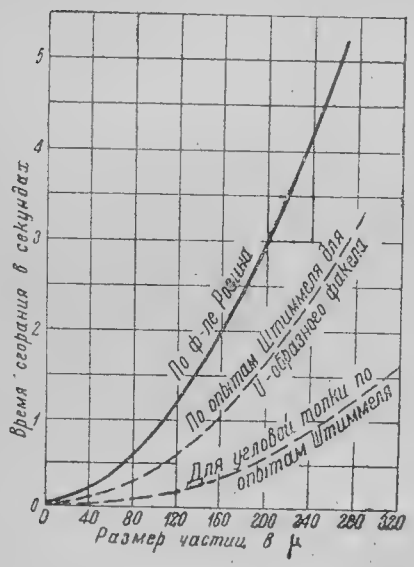


Рис. 304. Зависимость времени горения от величины частиц пыли.

Наиболее важным преимуществом пылеугольного отопления, выявленным во время этих и предыдущих опытов, является возможность производить в широких пределах регулирование количества сжигаемого топлива.

Из других преимуществ пылеугольного отопления следует указать:

1) возможность быстрого прекращения паров,

2) легкость и быстроту изменения нагрузки в желаемых пределах,

3) возможность применения при пылевидном сжигании низкосортного топлива,

4) возможность механизации всего процесса приготовления и сжигания угольной пыли.

[1] Power. 66, № 2, ст. 1032, 1927. Nat. El. Light Ass. pulverized Fuel. New-York, август 1928.

Таблица 107

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов				
				1	2	3	4	5
	Дата испытания			Начало: 27/VII 1927 г., конец: 6/VIII 1927 г.				
1	Продолжительность опытов	Z	час	48	48	48	48	48
	Анализ топлива							
2	Теплотворная способность топлива	$Q_н^р$	*кал/кг*	8000	7950	7950	8070	7950
3	Содержание углерода в топливе	$C^с$	%	81,8	80,7	81,3	82,3	80,6
4	Содержание кислорода в топливе	$O^с$	%	5,0	5,6	5,2	5,3	5,5
5	Содержание азота в топливе	$N^с$	%	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3
6	Содержание серы в топливе	$S_л^с$	%	1,2	1,6	1,6	1,4	1,7
7	Содержание водорода в топливе	$H^с$	%	4,9	4,8	4,9	4,8	4,8
8	Содержание влаги . . .	$W^р$	%	2,1	2,9	2,6	2,4	28
9	Содержание твердого кокса	$C^р$	%	72,1	70,9	71,7	72,2	70,0
10	Содержание летучих веществ	$V^р$	%	20,1	20,1	20,0	20,4	21,1
11	Содержание золы . . .	$A^р$	%	5,7	6,1	5,7	5,0	6,1
12	Сожжено угля в час . .	B	*кг/ч*	546,3	627,3	7.5	816,5	896
13	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	*т-кал/м³ч*	330	380	435	495	530
14	Общий вес золы и шлака в сожженном угле .	$G_{з+ш}$	*кг*	1500	1800	1980	1960	2620
15	Температура плавления золы	$t_{пл.\ з}$	°Ц	1300	1300	1300	1300	1300
16	Теплотворная способность золы	$Q_{з+ш}$	*кал/кг*	2878	2878	2878	2878	2875
17	Разрежение в топке . .	$\Delta S_т$	*мм* вод. ст.	4,5	7,6	6,3	5,4	4,9
18	Содержание CO_2 в газах	CO_2	%	16,18	16,71	17,01	17,10	16,26
19	Содержание O_2 в газах .	O_2	%	2,65	1,97	1,72	1,57	2,78
20	Содержание N_2 в газах .	N_2	%	81,17	81,32	81,23	81,25	80,95
	Коэфициент избытка воздуха	α	—	1,14	1,10	1,09	1,08	1,15
21	Температура газов перед возд. подогревом .	$(t_г)'_{в.\ п}$	°Ц	214—260	234—290	260—317	278—333	283—340

Продолжение табл. 107

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов				
				1	2	3	4	5
	Воздух							
22	Давление вторичного воздуха после вентилятора	$\Delta S_{воз}$	*мм* вод. ст.	41	41,7	50,5	56	56,3
23	Среднее давление аэросмеси	$\Delta S_{см}$	» » »	35	39	41	45	51,5
24	Среднее давление в горелке	$\Delta S_{гор}$	» » »	24,3	23,8	28,4	32,8	34
25	Температура в распределителе аэропыли . .	$t_{аэр}$	°Ц	62	64	60	60	59
26	Давление вторичного воздуха в фронтовом канале	$\Delta S_{фр}$	*мм* вод. ст.	13,5	11	14,3	26	31
27	Температура в горелке .	$(t)_{гор}$	°Ц	100	103	102	99	97
28	Температура воздуха в котельной	$(t_{возд})_к$	°Ц	38	35	37	33	35
29	Расход мощности на размалывание угля . . .	$N_э$	*квт · ч/т*	20,57	20,73	20,83	20,71	21,18
30	Расход мощности на размалывание 1 *т* угля	$\frac{N_э}{B}$	*квт · ч/т*	38	33	28,8	25,4	23,6
	Пар и вода							
31	Давление пара в котле .	$P_к$	*ати*	13,36	13,36	13,4	13,44	13,5
32	Температура питательной воды	$(t_в)'_к$	°Ц	98	98,0	100	97	99,0
33	Влажность пара		%	0,20	0,19	0,19	0,18	0,16
34	Испарено воды за час .	D	*кг/ч*	6105	7130	8033	9008	9270
35	Паронапряжение поверхности нагрева котла .	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	25,4	30,0	33,7	38,1	39,0
36	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	10,16	10,81	10,54	10,46	9,86
	Тепловой баланс котельной установки							
37	К. п. д. котла	$\eta_к$	%	74,89	77,06	74,72	73,35	70,26
38	Потери от химической неполноты сгорания .	$q_з$	%	3,64	3,64	3,96	3,97	3,89
39	Потери на подсушку угля	$q_{суш}$	%	0,17	0,24	0,22	0,21	0,25
40	Потери с уходящими газами	q_2	%	6,95	7,53	8,43	9,10	9,84
41	Потери от механической неполноты горения	q_4	%	7,45	6,43	7,22	8,57	11,16
42	Потери в окружающую среду	q_5	%	6,9	6,1	5,45	4,8	4,6

Пылеугольное отопление не лишено и недостатков. Основные из них:

1) увеличение веса котельной установки за счет пылеприготовительного оборудования (дробилки, мельницы, вентиляторы, двигатели, топливопроводы и т. д.);

2) усложнение установки;

3) увеличение вероятности остановки пылесжигательной установки из-за наличия в ней большого числа элементов, могущих оказаться поврежденными;

4) необходимость одновременно иметь и оборудование для нефтяного отопления на случай разводки паров и вынужденной остановки пылеугольного отопления;

5) трудность удаления золы и шлаков из топки. До сих пор еще не удалось разрешить проблему сжигания в виде пыли многозольных топлив с легкоплавкой золой.

Все перечисленные здесь недостатки успешно преодолеваются, и число пылесжигательных установок на судах с каждым годом продолжает возрастать.

В процессе эксплоатации пылесжигательных судовых установок выработались три наиболее распространенных типа их:

Первый тип: американский — государственного департамента США — центральное обслуживание топок при помощи одной мельницы и одного вентилятора. Пример — пароход «Mercer».

Второй тип: английский, индивидуальное обслуживание одной или группы топок. Пример — пароход «West Alsek».

Третий тип: смешанный тип, когда одной мельницей обслуживаются топки одного котла по кольцевой системе питания форсунок угольной пылью.

Рассмотрим каждую пылесжигательную систему в отдельности.

205. Центральная система пылесжигания на пароходе «Mercer» [1]

Американский пароход «Mercer» (водоизмещение — 9,7 *т*) в конце 1927 г. был переведен на пылеугольное отопление.

Пылесжигательная установка на пароходе «Mercer» отличается от рассмотренной лишь тем, что в ней одна мельница Кеннеди обслуживала девять горелок Пибоди, размещенных в трех котлах. Вторая мельница служила резервом.

Червячные транспортеры забирают уголь из расходных бункеров и подают его в дробилки, где он раздробляется на кусочки размером 30 *мм* и меньше. Измельченный в дробилке уголь поступает затем в шаровую мельницу и размалывается.

Для облегчения размалывания и для подсушки угля мельница проветривается горячим воздухом. Образовавшаяся в угольной мельнице смесь горячего воздуха и угольной пыли отсасывается вентилятором и нагнетается к девяти форсункам Пибоди, расположенным в трех шотландских котлах.

В табл. 108 приведены характеристики сухого угля на пароходе «Mercer», взятого из бункера в период его эксплоатации в 1928 г.

Пароход «Mercer» до осени 1928 г. сделал шесть рейсов между Нью-Йорком и Роттердамом. Расписание рейсов соблюдалось точно: не было потеряно ни одного дня.

---

[1] Jefferson C. J. Development of pulvered fuel for marine purposes during 1927—1928. Transactions of the Soc. of naval arch. and marine engineers. Стр. 165—183, 1928. Дискуссия, стр. 183—195.

Таблица 108

Состав топлива	№ проб топлива							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Летучих веществ в %	16,6	18,8	20,0	20,4	22,8	29,1	29,5	30,35
Твердого кокса в %	73,2	70,8	73	72,8	69,45	57,5	62,2	62,55
Золы в %	10,2	10,4	6,3	6,8	7,75	13,0	8,3	7,10
Серы в %	2,14	1,0	1,4	1,5	1,2	2,4	1,75	1,6
Теплотворная способность в *кал/кг*	7700	7350	8100	8120	8020	7120	7920	8025
Температура плавления золы в °Ц	—	—	1375	—	1475	1285	—	—

Эксплоатация парохода еще раз доказала возможность применения пылесжигания на судах, хотя встретились большие затруднения с получением равномерного распределения угольной пыли по отдельным горелкам. После каждого рейса вносились изменения и усовершенствования в распределители угольной пыли.

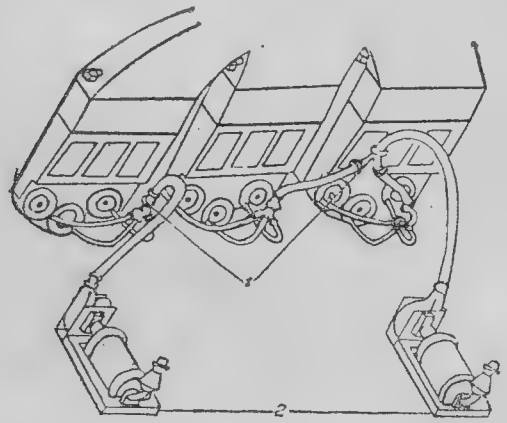


Рис. 305. Центральная система пылесжигания.

В процессе эксплоатации выявилась непрактичность центральной системы пылеприготовления. Из-за сложных форм изгибов трубопроводов и больших их размеров получались большие сопротивления. В связи с этим центральное пылеприготовление переделали так, что каждая мельница могла обслуживать два котла. Раньше одна мельница обслуживала два котла, а вторая — один (рис. 305). На рис. 305а показана схема последовательных переделок пылепроводов.

Сравнение парохода «Mercer» по расходу топлива с пятью однотипными пароходами, отопление которых производилось вручную на решетках, показало экономию угля в 8,3%. Обслуживание котельной на пароходе «Mercer» производилось двумя рабочими (кочегар и подручный). Обслуживание такой же котельной при ручном отоплении требовало четырех рабочих, троих кочегаров и одного подручного.

206. Индивидуальная система пылеприготовления парохода «West Alsek» [1]

На рис. 306 показана общая схема установки пылесжигания на пароходе «West Alsek» водоизмещением в 8800 *т*. Мощность машинной установки парохода равна 2750 *и. л. с.* Процесс работы установки

[1] Mar. Eng-r & Mtshb. Стр. 360—361, 1929. Todd. Pulverized fuel equipment on the „West Alsek".

можно представить так. Уголь подается из расходного верхнего бункера в общую для всей котельной угольную дробилку, откуда он поступает самотеком в винтовой конвейер, расположенный поперек судна. Последний имеет 9 лотков, направляющих раздробленный

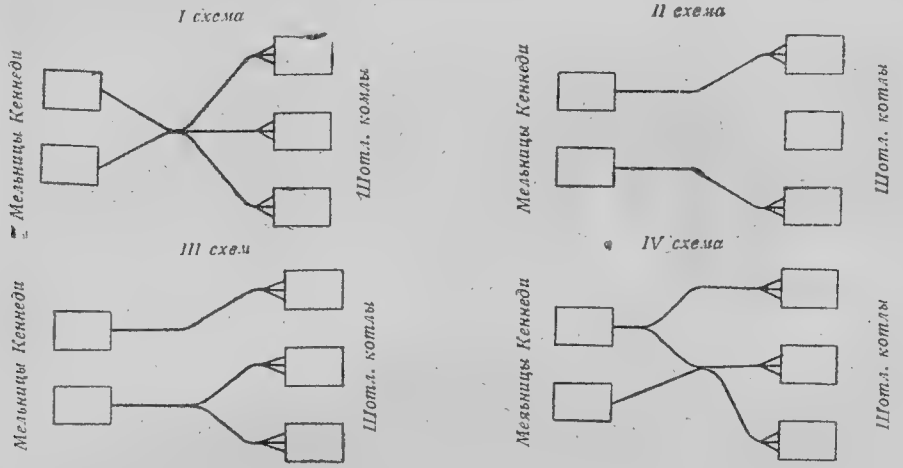


Рис. 305а. Схема последовательных переделок пылепроводов на пароходе „Merser".

уголь в 9 индивидуальных мельниц типа Тодда. Каждая мельница приводится в движение отдельным электромотором и готовит уголь только для одной топки (на рис. 306 показана только часть установки; видны 3 мельницы из 9).

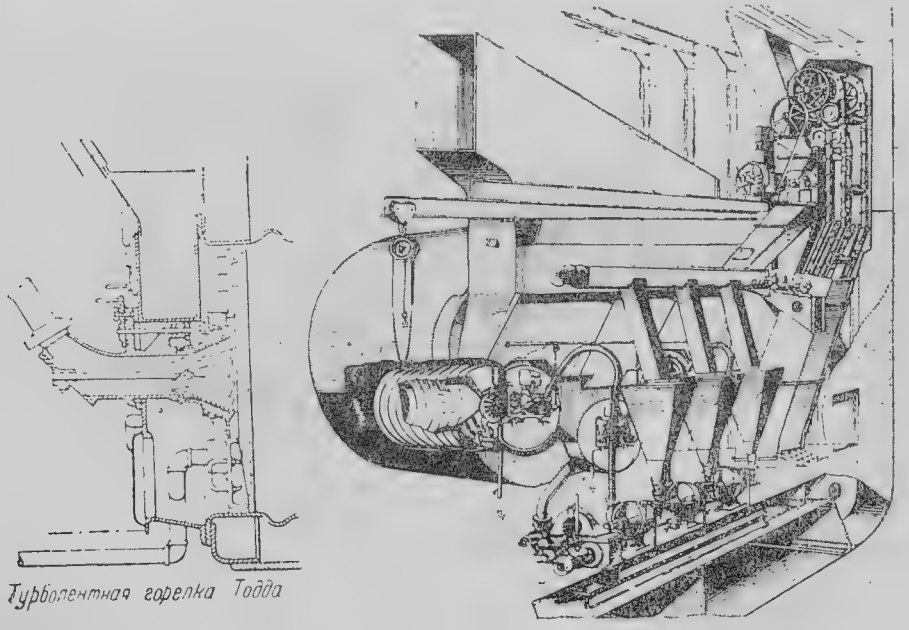


Рис. 306. Индивидуальная система пылесжигания.

Регулирование количества угля, поступающего в топку, производится дисковым питателем. Все мельницы вентилируются горячим воздухом.

На рис. 307 и 307а показано устройство мельницы Тодда[1] и ее детали. Состоит она, подобно вентилятору, из двух роторов с лопатками. Роторы устанавливаются по обе стороны вентилятора. Последний засасывает из мельниц угольную пыль и нагнетает ее в горелку. Здесь аэропыль завихривается при помощи лопат, насаженных на горизонтальный шток. Для регулирования степени завихривания лопатки можно двигать вдоль трубы. Завихренный поток аэропыли при выходе из горелки подхватывается и еще сильнее завихривается вторичным воздухом. Последний получает вращательное движение при омывании наружных граней расширяющегося насадка горелки.

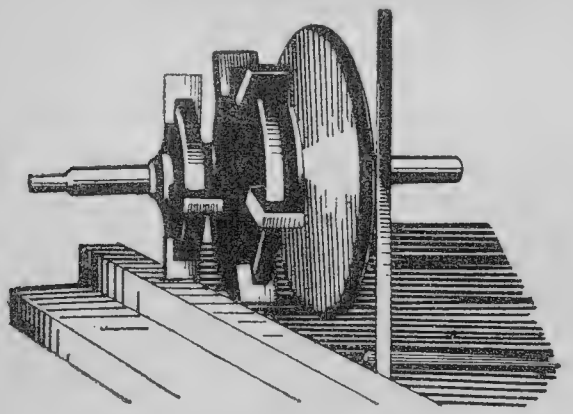


Рис. 307. Мельница Тодда.

При индивидуальной системе пылеприготовления представляется возможность легко и просто регулировать в необходимых пределах количество угольной пыли, поступающей в горелку. В этой системе отсутствуют распределители, составляющие слабое место в пылесжигательной установке. Но преимущества системы Тодда были достигнуты за счет усложнения установки. Вместо двух мельниц работало девять мельниц, и каждая имела свой бункер, питатель и топливопровод.

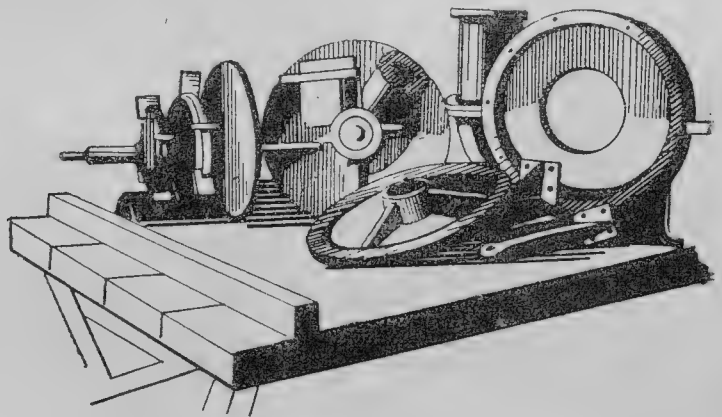


Рис. 307а. Мельница Тодда в разобранном виде.

207. Кольцевая смешанная система пылеприготовления

Смешанное пылеприготовление было установлено на пароходе «Berwindvale» водоизмещением 7500 т[2]. Пароход имел два шотланд-

[1] Нем. пат., № 518536, 1931 г. Англ. пат., № 295352, 1927 г.

[2] Burkhardt. The Collers „Berwindvale" and „Berwindglen". Transact. of the Soc. of Nav. Arch. and mar. eng., стр. 159—163, 1929 (дискуссия, стр. 163—167).

ских котла, дающие пар для машин в 2000 *и. л. с.* Суммарная поверхность нагрева котлов составляла 624 *м²*.

Пылеприготовление для каждого котла производилось мельницей системы «Резолютор» (рис. 308). Устройство мельницы таково. Топливо, подлежащее перемалыванию, поступает в воронку *1*, а из нее — на ленточный питатель *2*. Последний приводится в движение от вала мельницы посредством ременной и зубчатой передачи. Регулирование количества угля, поступающего в мельницу, может производиться изменением или скорости движения ленты, или положения шибера (рис. 309). При вращении шкивов полотно забирает из воронки равный слой угля и подает его в мельницу; последняя наподобие вентилятора состоит из кожуха и ротора. Кожух изнутри покрыт сменными бронзовыми плитами. Ротор представляет собой сменный диск, на ко-

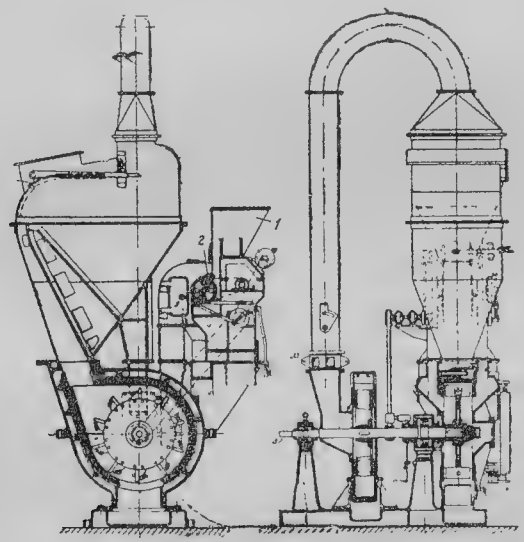


Рис. 308. Мельница „Резолютор".

тором насажены 12 стальных бил. Ротор мельницы вращается со скоростью 1450 об/мин. от электромотора. Размалывание угля производится от ударов угольных частиц о быстро вращаемые била и броневые плитки. В случае износа плитки и била вместе с ротором могут заменяться новыми.

Для ускорения замены ротора с изношенными билами мельница «Резолютор» снабжена герметическими дверцами (рис. 310). Вся операция замены ротора продолжается около часа.

Перемолотый уголь поступает в сепаратор. Более тяжелые частицы угля, попавшие в сепаратор, направляются обратно в камеру размалывания, а более легкие отсасываются вентилятором и нагнетаются в топку. Размер и количество выпадающих в сепараторе частиц угля могут регулироваться поворотом дефлектора *Б* (рис. 311).

Мельница «Резолютор» в сравнении с мельницей Кеннеди имеет ряд важнейших преимуществ:

1) небольшие габаритные размеры,
2) почти вдвое меньший удельный расход на размол угля,
3) небольшой вес.

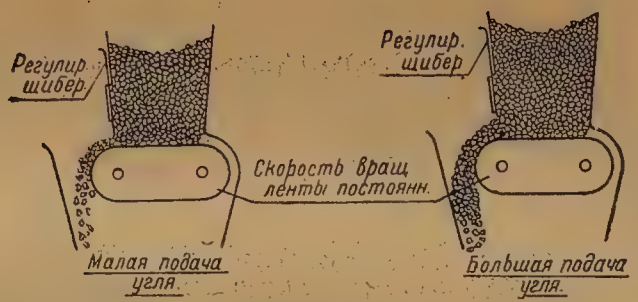


Схема регулирования подачи угля изменением положения шибера при постоянной скорости вращ. ленты.

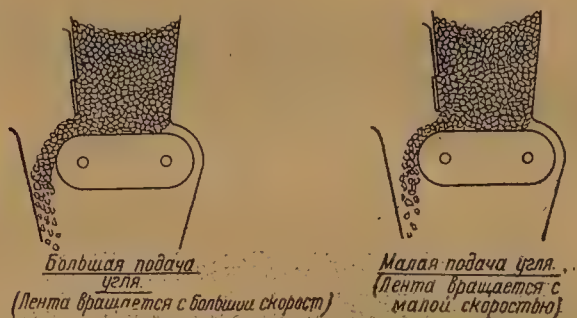


Схема регулирования подачи угля изменением скорости вращения ленты при постоянном положении шибера.

Рис. 309. Схема регулирования подачи угля в мельницу „Резолютор"

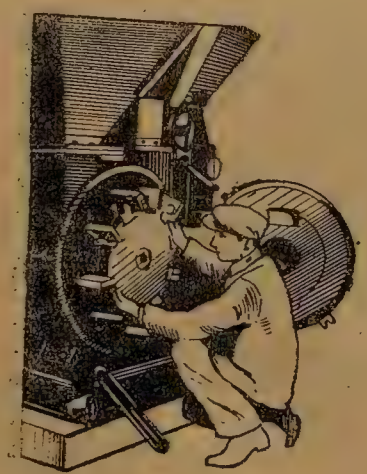


Рис. 310. Замена ротора мельницы „Резолютор".

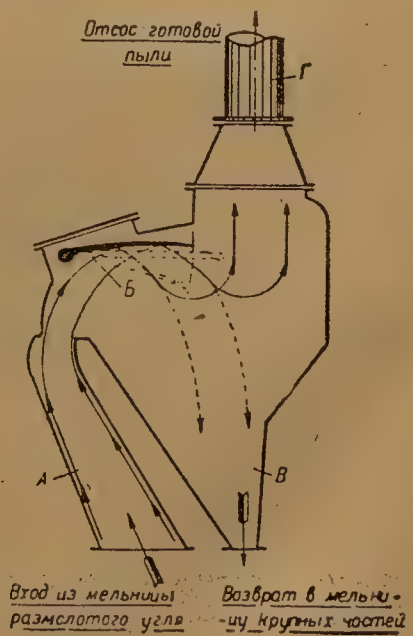


Рис. 311. Сепаратор мельницы „Резолютор".

Благодаря перечисленным преимуществам, мельница «Резолютор» получила весьма широкое распространение, в особенности на судах. Она хорошо справлялась с размалыванием сухих и мягких углей.

Но мельница «Резолютор» принесла с собой и новые недостатки:

1) более дорогое обслуживание мельницы,

2) невозможность вентиляции мельницы высоко подогретым воздухом, вследствие чего в ней нельзя размалывать уголь с повышенной влажностью,

3) более грубый помол,

4) быстрый износ бил и брони.

Пылесжигание в установке на пароходе «Berwindvale» протекает так. Из сепаратора уголь засасывается вентилятором и нагнетается

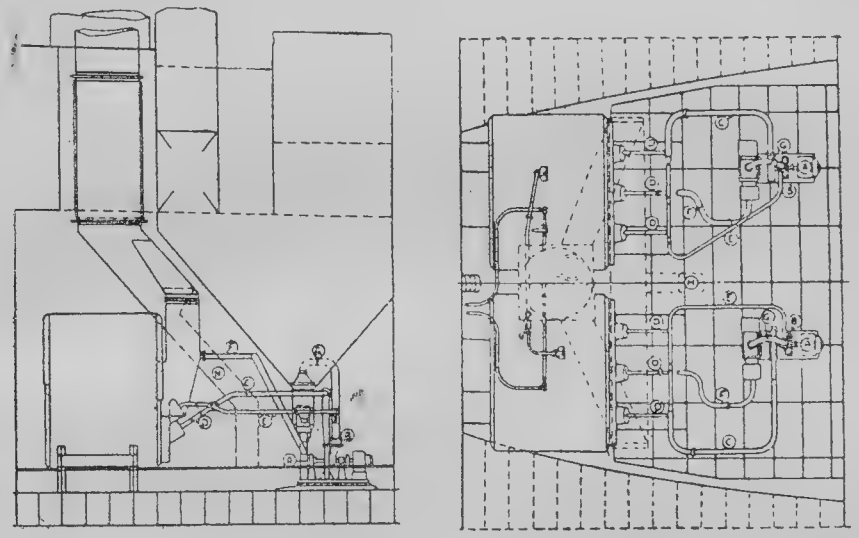


Рис. 312. Кольцевая система пылесжигания.

A—угольные мельницы с электромотором, *B*—вентиляторы для подачи аэропыли к пробкам, *C*—кольцевой углепровод, *E*—ответвления углепровода к топкам, *E*—обратная труба к мельнице, *F*—подача горячего воздуха из воздухоподогревателя к мельнице, *G*—подача аэропыли из сепаратора к вентилятору, *H*—золоудалитель.

в углепровод *C*. Из последнего аэропыль распределяется в три отвода *D*, *D*, *D* и направляется по ним к горелкам. Сечение углепровода (рис. 312) после каждого отвода уменьшается. Это обеспечивает сравнительно равномерное распределение пыли по отдельным горелкам. Часть аэропыли, не попавшая в горелки, снова возвращается по трубопроводу к вентилятору, совершая таким образом кольцевое движение. Кольцевая система питания горелок угольной пылью по эксплоатационным наблюдениям довольно легко позволяла поддерживать равномерное распределение угольной пыли по горелкам. На рис. 313 показана горелка Вудсона, применяемая к рассматриваемой установке. Угольная пыль в горелку подается по концентрической трубе. По выходе из трубы пыль смешивается с частью вторичного воздуха и направляется в винтовой наконечник, где она завихривается. Другая часть вторичного воздуха поступает в топку через щели горелки, расположенные за винтовым наконечником.

Первичный и вторичный воздух в данной установке подогревается в воздухоподогревателе до 200—220°. Подогрев воздуха, поступающего в топку, при пылеугольном отоплении обязателен.

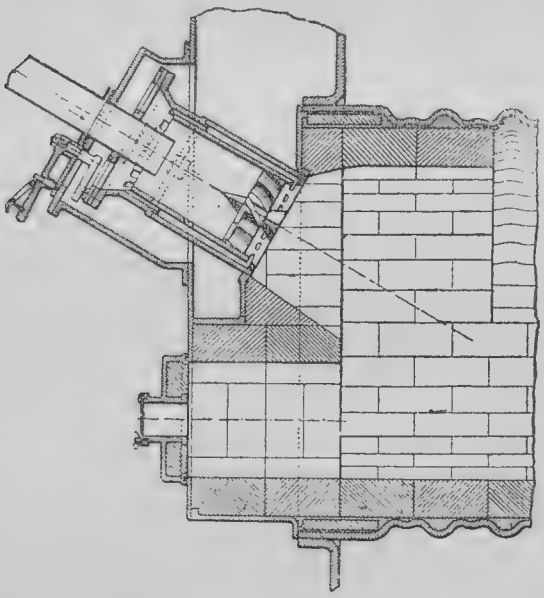


Рис. 313. Горелка Вудсона и часть топки.

На рис. 313 показано устройство части топки. Верхняя часть топки облицована огнеупорным кирпичом лишь на длине 600 *мм*. Внизу топка имеет облицовку почти по всей длине топки. Такая облицовка способствует сгоранию частиц угля в кратчайший срок. Нагревание каждой частицы угля до температуры воспламенения ускоряется под действием теплоты, излучаемой не только факелом, но и облицовкой. При такой конфигурации обмуровки шлак попадает на кирпичный под, а не на стенки котла. Это почти исключает вредное действие шлака на металлические стенки котла. Под горелкой имеется люк, через который можно наблюдать состояние топки и процесс горения. Через этот же люк, в случае надобности, спускается накопившийся в шлаковой ванне топки (рис. 313а) жидкий шлак.

Жидкое шлакоудаление в настоящее время начинает широко распространяться как в стационарных, так и в судовых установках. Оно

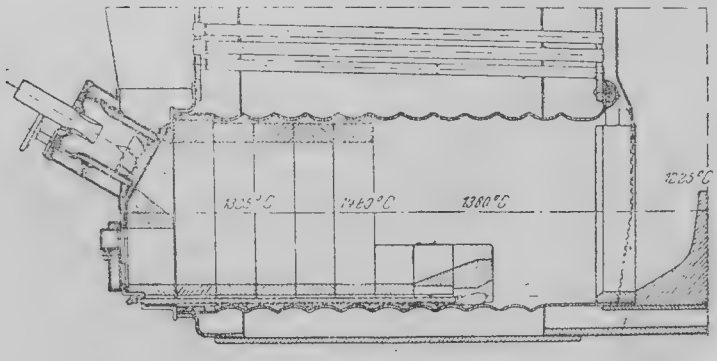


Рис. 313а. Пылеугольная топка с жидким шлакоудалением.

позволяет весьма легко, удобно и без понижения паропроизводительности котла производить удаление шлака из топки.

Приводим некоторые характеристики рассматриваемой установки, полученные опытным путем.

Таблица 109

№ по пор	Наименование	Обозначение	Размерность	„Berwindglen“	„Berwindvale“
1	Дата испытания			1929 г.	1929 г.
2	Водоизмещение		*т*	4802	4170
3	Мощность	N	*л. с.*	1540	1530
4	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	11,9	17
5	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	—	326
6	Испарено воды	D	*кг/ч*	15350	11000
7	Температура воздуха в котельной . .	$(t_в)_к$	°Ц	40	33
8	Температура воздуха перед горелкой	$(t_в)'_{гор}$	°Ц	120	106
9	Содержание CO_2 в уходящих газах . .	CO_2	%	13,5	12,4
10	Теплотворная способность топлива . .	Q	*кал/кг*	7760	7950
11	Видимая испарительность топлива . . .	$И_в$	*кг/кг*	10,35	9,56
12	Стандартная испарительность топлива $\Delta i_н = 540$ *кал/кг*	$И_с$	„	11	10,82
13	К. п. д. котла	η	%	75,4	73,6
14	Расход пара на 1 *л. с. ч*	$\frac{B}{N}$	*кг/л. с. ч*	0,96	0,75

Как показали опытные наблюдения, установка работала весьма экономично и была надежна в эксплоатации. За 14 месяцев работы стальные плиты не менялись ни разу, и только два раза пришлось сменить била ротора. Рассмотренная кольцевая система пылесжигания получила наибольшее распространение. Пылеприготовлением по этой системе были оборудованы пароходы «Hororat», «Berwindglen», «Stasturt».

Применение пылесжигания одновременно позволило сократить количество рабочих, обслуживающих котлы. Вместо 9 кочегаров, необходимых при ручном отоплении на однотипном судне, на пароходе «Berwindvale» при пылесжигании достаточно было только 3 кочегаров.

Для более полной картины эксплоатационных характеристик кольцевой системы пылеприготовления рассмотрим еще одну пылесжигательную установку на землечерпалке «Басюр де Басе». В табл. 110 приведены основные данные силовой установки землечерпалки.

Перевод землечерпалки на пылеугольное отопление был вызван желанием повысить экономичность и гибкость работы установки, особенно в части быстроты возобновления работы после вынужденных перерывов. Оборудование пылеприготовления на землечерпалке в основном было такое же, как и на пароходе «Berwindvale».

Угольная пыль на землечерпалке приготовлялась в двух мельницах «Резолютор», которые приводились в движение паровым двигателем. Каждая мельница посредством перестановки лишь одного патрубка могла довольно быстро приспосабливаться для питания угольной пылью любого котла.

Таблица 110

Наименование	Обозначение	Размерность	№опытов
Число машин компаунд			2
Суммарная мощность	N_i	*л. с.*	800
Число цилиндрических котлов		шт.	2
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	9
Количество топок в котле		шт.	3
Внутренний диаметр топок	$d_т$	*м*	1,04
Длина топок	$l_т$	»	2,166
Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	157
Объем воды в котле	$V_в$	$м^3$	20,92
Объем пара в котле	$V_{пар}$	»	10,45

Во время пуска котла с холодного состояния пар для паровых двигателей мельниц вырабатывался в специально поставленном маленьком вспомогательном котелке, отапливаемом мазутом. Для облегчения размола и для подсушки угольной пыли воздух в мельницу подавался подогретым примерно до 500° Ц. Нижняя половина топки была облицована кирпичом по всей длине топки, а верхняя только по длине 450 *мм* с фронта котла. В топке можно было поддерживать температуру до 1500° Ц, отчего шлак, выпадающий на кирпичный под топки, становился жидким. Спуск шлака и золы из топки производился также в жидком виде.

Зола и шлаки, отлагающиеся в огневых коробках, удалялись через пустотелую связь (диаметром в 150 *мм*), которая закрывалась снизу металлической пробкой. Шлак из топки удалялся через специальные дверцы с фронта котла.

В эксплоатации рассмотренная установка работала вполне хорошо. Некоторое представление о теплотехнических характеристиках ее работы могут дать данные, полученные во время испытаний.

Данные табл. 111 указывают на высокий к. п. д. котла, равный 72—82% против 60% при прежнем отоплении этих же котлов. Примерно такие же данные в отношении экономичности работы установки показывают эксплоатационные наблюдения. Например, средний расход угля на землечерпательной установке за 1930—31 г. при пылеугольном отоплении составлял 1,55 *кг* на 1 $м^3$ грунта против 2,08 *кг* при ручном отоплении.

208. Пылеугольное отопление водотрубных котлов

В 20-х гг. нашего столетия под пылеугольное отопление приспосабливались не только шотландские, но и судовые водотрубные котлы. Изучение и освоение работы пылесжигательных установок в шотландских и водотрубных котлах протекало почти одновременно.

Таблица 111

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов			
				1	2	3	4
1	Дата испытания			21/VII 1930 г.	30/VII 1930 г.	31/VII 1930 г.	1/VIII 1930 г.
2	Продолжительность испытания .	Z	час.	3	3,85	6	6,15
	Анализ топлива:						
3	Теплотворная способность топлива	$Q^р$	*кал/кг*	6022	6026	6003	6016
4	Содержание углерода в топливе .	$C^р$	%	50,35	50,44	50,27	50,42
5	Содержание влаги в топливе . .	$W^р$	%	11,66	11,50	11,8	11,52
6	Содержание золы в топливе . .	$A^р$	%	8,72	8,74	8,71	8,74
7	$(N_2 + O_2 + H_2 + S^р_л)$ в топливе .		%	19,27	29,32	29,29	29,32
8	Сожжено топлива за 1 час . . .	$B_ч$	*кг/ч*	477	498	519	546
	Вода и пар:						
9	Температура питательной воды .	$t'_к$	°Ц	19	18	18	20
10	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	7,55	8,10	8,05	8,14
11	Испарено воды в час	D	*кг/ч*	3791	3590	3630	4150
12	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	7,94	7,19	7,00	7,60
	Воздух:						
13	Температура наружного воздуха .	$t_в$	°Ц	—	30	30	30
14	Температура первичного воздуха .	$(t_в)_{перв}$	°Ц	270	300	300	290
15	Температура вторичного воздуха .	$(t_в)_{вт}$	°Ц	191	180	190	219
	Газы:						
16	Температура газов до воздухоподогреват.	$(t_г)'_{в.п}$	°Ц	380	409	377	401
17	Котлы			прав. борт	лев. борт	прав. борт	лев. борт
18	Температура газов после подогревателя	$(t)'_{в.п}$	°Ц	260	259	258	245
19	Содержание CO_2 в дымовых газах	CO_2	%	16	11,6	11,8	15,64
20	К. п. д. котла	$\eta_к$	%	81,9	74,2	72,5	7
21	Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	9,4	12,9	12,3	9,1
22	Потери тепла от механич. неполн. горения	q_4	%	5,4	5,4	5,4	5,4
23	Остальн. потери тепла		%	3,3	7,5	9,8	7
				100	100	100	100

Первые наиболее серьезные опыты[1] по приспособлению судовых водотрубных котлов под пылеугольное отопление были проведены фирмой Бабкока и Вилькокса и К° в Байонне над судовым водотрубным котлом данной системы (рис. 314). Поверхность нагрева испытуемого котла составляла 255 $м^2$, объем его топки равнялся 7,1 $м^3$.

Пылеприготовление в данной установке производилось в шаровой мельнице, поставленной фирмой Бабкока и Вилькокса . Как и в ранее

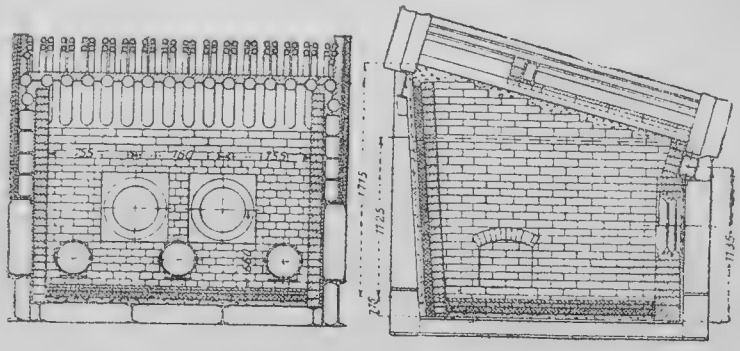


Рис. 314. Пылеугольная топка под котлом B и W.

рассмотренных установках, первичный воздух подавался в мельницы подогретым примерно до 80°. Вторичный же воздух поступал в топку холодным. Отказ от подогрева вторичного воздуха в данной установке был вызван желанием понизить температуру газов, покидающих топку, до температуры плавления золы и даже ниже. В против-

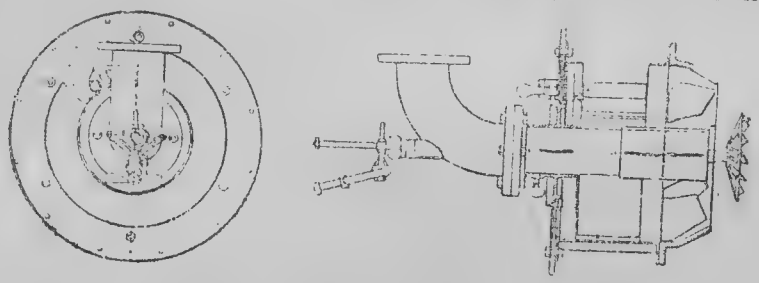


Рис. 315. Угольная горелка.

ном случае кипятильные трубки могли зарастать шлаком. Подогрев воздуха, поступающего в топку в данной установке, был возможен лишь при выполнении двух условий:

1) при сжигании угля, температура плавления золы которого при данном подогреве воздуха была бы выше температуры газов, вступающих в конвенкционную поверхность нагрева,

2) при покрытии стенок топки экраном на такую величину, чтобы топочные газы охлаждались до температуры, низшей, чем температура плавления золы.

На рис. 315 показано устройство угольной горелки, применявшейся во время испытания.

[1] Stillman T. B. Pulverized coal tests of a marine watertube boiler. Trans. of the Society of naval architects and marine engineers. Стр. 137—148, 1927. (Дискуссия стр. 148—163.)

Опытные наблюдения над работой данной установки показали, что горение угольной пыли происходило спокойно. Дымообразование отсутствовало, если содержание CO_2 в дымовых газах поддерживалось в пределах 11—13% (табл. 112).

Опыты пылесжигания в данной установке закончились вполне успешно (табл. 112). К. п. д. котла колебался в пределах 78—84%. В топке оставалась только часть золы (13—21%). Остальная зола уносилась в дымовую трубу. Для сравнения к. п. д. котла, получаемых при различных системах отопления, приведена диаграмма (рис. 316). Кривая *a* на ней показывает изменение к. п. д. котла при нефтяном отоплении в зависимости от паронапряжения поверхности нагрева котла. Кривая *b* показывает такое же изменение к. п. д. котла при пылеугольном отоплении, а кривая *c* — при ручном угольном отоплении. Меньшие значения к. п. д. при пылеугольном отоплении объясняются сравнительно большими служебными расходами. Расход

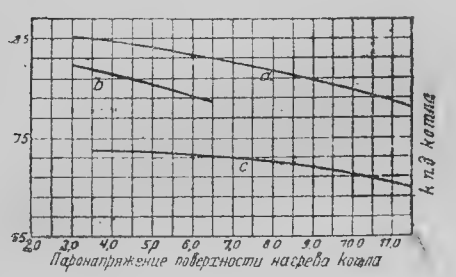


Рис. 316. Кривые сравнения к. п. д. котла. *a*—при нефтяном, *b*—при пылеугольном, *c*—ручном угольном отоплении.

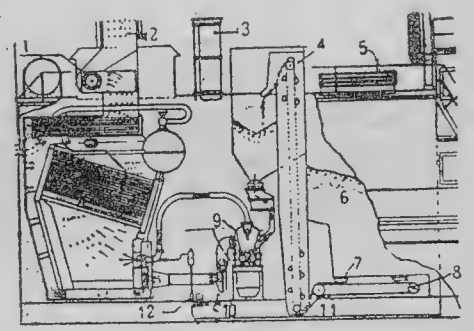


Рис. 316а. Общий вид котла и пылеприготовления на пароходе „Двайт-Девис". *1*—дымосос. *2*—дымник с воздухоподогревателем. *3*—вентиляторная труба. *4*—элеватор. *5*—угольный люк. *6*—бункер. *7*—дверцы для выпуска угля. *8*—ленточный конвейер. *9*—мельница. *10*—вентилятор первичного воздуха. *11*—нефтяной насос.

пара при нефтяном отоплении на нефтяной насос и подогрев нефти (служебный расход) равен примерно 1%. Расход пара на работу двигателей мельницы и топливных вентиляторов составляет примерно 7,5% от производимого пара.

После получения удачных результатов работы опытной пылеугольной установки, такая же установка была поставлена на речной буксир «Двайт ф. Девис» (рис. 316а). Каждый котел системы Бабкока и Вилькокса этого парохода был снабжен мельницей «Фулер Легай». Вес пылеприготовительной установки на данном пароходе = 4,1 *т* на 1 *т* помола в час.

209. Пылеугольное отопление судовых котлов в СССР

На основе бурного роста производительных сил СССР высокими темпами развивалась и металлургическая промышленность.

Характеризуя на XVII съезде ВКП(б) наши достижения, тов. Сталин сказал[1]: «Из всех отраслей народного хозяйства наиболее быстро росла у нас промышленность... В нашей все еще молодой в техническом отношении стране промышленность имеет особую задачу. Она

[1] Сталин И. Отчетный доклад XVII съезду партии о работе ЦК ВКП (б). Партиздат, стр. 21 — 22, 1934.

Таблица 112

	Обозначение	Размерность	Дата испытания: 1927 г., июль и август									
			25/VI	26/VII	27/VII	28/VII	29/VII	4/VIII	5/VIII	11/VIII	16/VIII	17/VIII
Продолжительность испытания	Z	час.	4,5	7	5	6	7	7	6	5	6	6
Давление пара в перегревателе	$P_{пе}$	*ати*	14,4	13,4	13,4	13,2	13,4	13,0	14,5	12,6	12,9	13,2
Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	250	222	235	229	237	220	220	228	233	232
Температура газов в топке	$t_т$	°Ц	1160	1230	1260	1245	1255	1235	1145	1361	1355	1400
Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	216	218	240	228	249	227	218	244	242	234
Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_в)'_т$	°Ц	75	76	84	85	87	85	86	64	74	—
Давление газов в топке	$\Delta S_т$	*мм* вод. ст.	17,5	22	9,3	1,3	7,2	1,25	0,5	4,2	8,6	14,0
Давление воздуха перед горелкой	$(\Delta S)'_г$	*мм* вод. ст.	56	66	111	76	108	51	37	66	62	60
Анализ уходящих газов (CO во всех опытах равно нулю): содержание RO_2	RO_2	%	12,57	13,22	12,4	12,35	12,39	11,25	12,68	12,0	12,16	12,57
" O_2	O_2	%	6,48	6,17	6,52	6,53	6,68	7,65	6,3	6,94	7,3	6,67
" N_2	N_2	%	80,95	80,61	81,08	81,12	80,93	81,10	81,02	80,06	80,54	80,76
Температура воды, поступающей в котел	$(t)'_к$	°Ц	77	91	92	27	27	92	94	87	91	85
Испарено воды в час ($\Delta i_н = 540$ *кал/кг*)	$D_с$	*т/ч*	3,6	4,33	6,92	4,92	6,74	3,94	2,7	5,07	5,4	6,0
Стандартное паронапряжение нов. нагрева	$\frac{D_с}{H_к}$	*кг/м²ч*	14	16,9	27	19,2	26,3	15,4	10,6	19,8	21,2	23,3
Часовой расход топлива	B	*кг/час*	330	393	654	471	640	372	254	480	480	534
Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	*т·кал/м³ч*	335	397	667	467	635	373	247	471	507	568
Вводится воздуха вторичного в топку, в % от общего количества воздуха	m	%	—	63,7	43,6	51,5	41,3	63,14	58,85	—	507	45
Коэфициент избытка воздуха	α	—	1,35	1,33	1,38	1,347	1,32	1,36	1,32	1,38	1,35	1,33
Расход энергии на пылеприготовление и транспорт	$\frac{N}{B}$	*л. с./т* угля	70	64	66	58	64	67	94	57	58	53
К. п. д. котла и перегревателя	$\eta_{к+пе}$	%	81,2	82,97	78,7	80,01	80,62	80,42	83,56	81,85	81,46	80,34
Потери тепла в окружающую среду	q_5	%	5,18	4,39	7,16	6,18	4,47	4,8	3,0	2,89	4,01	6,06

Топливо — каменный уголь	Dundon gas slack								Pacahontas	
Анализ топлива	Тверд. кокса	Летуч. вещ.	Влаги	Углерода	Кислорода	Водорода	Азота	Серы	Золы	Т-ра плав. золы
	C	$V^р$	$W^р$	$C^с$	$O^с$	$H^с$	$N^с$	$S^с$	$A^с$	пл. з.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	°Ц
Dundon gas slack	53,71	34,5	4,94	74,75	0,3	4,97	1,39	6,8	11,79	1485
Pohotas	73,57	16,23	4,24	81,59	2,2	4,24	1,18	0,59	10,2	1480

Характеристики котельной установки: поверхность нагрева $H_к = 256$ *м²*, объем топки $V_т = 7{,}08$ *м³*

Золовой баланс:

Дата опытных наблюдений						21—22 VII	25—29 VII	2—6 VIII	10—12 VIII	16—19 VIII
Продолжительность наблюдений	Z	час.				12,6	106,33	77,33	53,78	77
Сожжено топлива за опыт	ZB	*кг*					43300	28410	22900	33700
Содержание золы в топливе	$A^р$	%				14,76	11,66	12,17	13,98	9,23
Количество золы в топливе по анализу	ZG	*кг*				955	5050	3420	3200	3110
Собрано очаговых остатков в топке	$ZG_{оч.\ ост}$	*кг*				204	940	481	409	624
Содержание золы в очаговых остатках	$A_{оч.\ ост}$	%				99,75	99,75	99,72	99,55	99,98
Собрано золы в топке	$ZG_{зол}$	*кг*				203	936	479	407	624
Собрано золы в топке в % от всего количества золы в топке	$(G_{зол})_т$	%				21,34	18,55	13,82	12,72	19,96

должна реконструировать на новой технической базе не только себя самое, не только все отрасли промышленности, в том числе легкую, пищевую, лесную промышленность. Она должна еще реконструировать все виды транспорта и все отрасли сельского хозяйства. Но она может выполнить эту задачу лишь в том случае, если машиностроение — основной рычаг реконструкции народного хозяйства — займет в ней преобладающее место. Данные отчетного периода показывают, что машиностроение завоевало у нас в общем объеме промышленности ведущую роль».

Рост машиностроения вызвал бурный рост металлургической промышленности, которая продолжает расти быстрыми темпами и в настоящее время (табл. 113).

Таблица 113

№ по пор.	Наименование	Размерность	Годы	
			1930	1934
1	Производство чугуна в СССР .	млн. *т*	5	10,5
2	То же в процентах	%	100	210

Быстро растущая металлургическая промышленность СССР потребовала для своих нужд большого количества коксующихся углей. Резко изменилась картина поставки угля для отопления судовых котлов. Лучшие сорта углей марок ПЖ и Ф, применявшиеся раньше во флоте, в настоящее время пошли на нужды металлургических заводов. Для отопления судовых котлов отпускали лишь худшие сорта ПЖ, ПС, Г, ГО и неспекающиеся угли марки Г [1].

При сжигании углей этих марок в судовых условиях на простых колосниковых решетках встретились большие трудности. Увеличивалось физическое напряжение работы кочегаров, падала паропроизводительность котла, и уменьшался к. п. д. до 50%. В результате уменьшения паропроизводительности понижалась мощность силовой установки, что приводило к уменьшению скорости судов. Все это, в конечном счете, отражалось на грузообороте судов.

Невозможность эффективного сжигания отпускаемых для флота углей побудила Совет труда и обороны 23 августа 1930 г. вынести постановление, обязывающее водный транспорт начать перевод судовых котлов на пылеугольное отопление.

Такое решение было продиктовано преимуществами пылесжигания низкосортных углей, выявленными при эксплоатации ряда судовых пылеугольных установок за границей и стационарных установок в СССР. Следует заметить, что понятия преимуществ пылеугольного отопления у нас и за границей различны.

Основными преимуществами пылеугольного отопления судовых котлов в наших условиях являются:

1) возможность эффективно сжигать низкосортные угли и освобождать для нужд металлургии большее количество высокоценного угля, потреблявшегося ранее флотом;

[1] Труды ВНИТОСС. Т. I, вып. 1, стр. 135—155, 1934.

2) возможность полной механизации обслуживания пылеугольной топки. Это освобождало кочегаров от чрезмерно тяжелого физического труда по обслуживанию ручных топок;

3) возможность получения экономии в расходе топлива, которая может быть направлена на социалистическое накопление;

4) возможность повышения паропроизводительности и мощности установки, что позволяет увеличить грузооборот, а, в конечном счете, и благосостояние трудящихся;

5) возможность сокращения расходов в инвалюте при заграничных плаваниях за счет использования дешевых низкосортных топлив.

Огромные расходы высокоценного топлива металлургией и транспортом, вызванные империалистической войной, побудили капиталистические пароходные компании заняться пылеугольным отоплением, которое позволяло без особого труда сжигать малоценные угли, имеющиеся почти во всех странах в большом избытке.

Одновременно война нарушила экономические связи между отдельными странами, сократила импорт нефти и высокоценного угля. Целые отрасли хозяйства были вынуждены перейти на применение низкосортных углей путем замены ручных топок механическими и пылеугольными.

Основными причинами применения пылеугольного отопления на судах в капиталистических странах являлось:

1) стремление капиталистов повысить свои прибыли за счет уменьшения расхода топлива, который составлял наибольшую долю эксплоатационных расходов (пылеугольное отопление могло дать экономии в расходе угля до 20%);

2) желание уничтожить зависимость получения полного хода судна от физической выносливости кочегаров;

3) стремление максимально увеличить быстроходность судна за счет непрерывной интенсификации работы котлов (при ручном отоплении интенсивность работы котлов периодически падает через каждые 3—4 часа в связи с чисткой топок);

4) стремление к независимости от людского состава в связи с обострением классовой борьбы. Так, например, в Германии вначале очень скептически относились к пылеугольному отоплению на судах, но после целого ряда крупных забастовок портовых рабочих и моряков в Гамбурге и Бремене интерес к пылеугольному отоплению значительно возрос. Германские судоходные компании, особенно северогерманский Ллойд стали вводить на своих пароходах пылеугольные установки, видя в этом возможность уменьшения числа рабочих и уменьшения за их счет расходов по зарплате;

5) повышение паропроизводительности и мощность установки давало возможность пароходовладельцам увеличить свои прибыли.

До 1933 г. не было опыта пылесжигания советских низкосортных углей в топках такого малого объема и длины, как жаровые трубы шотландских котлов. Перевод судовых котлов на пылеугольное отопление было решено начать с проведения опытов на судовом цилиндрическом котле, установленном на берегу.

В качестве опытного котла был выбран шотландский двухтопочный котел, установленный в котельных мастерских «Красный моряк» в Ростове на Дону (рис. 317).

К началу 1933 г. одна топка этого котла была приспособлена под пылеугольное отопление. Опытная пылеугольная установка (рис. 317) состояла из:

1) угольной дробилки «Клеро»,

2) угольной мельницы Тодда,
3) угольной горелки Фурштейна.

Для подсушки угля и облегчения размола в мельницу засасывались горячие газы. Перед входом в мельницу они разбавлялись холодным воздухом настолько, чтобы температура газов была равной 60—70° Ц, так как при более высокой температуре грелись опорные подшипники мельницы.

Вторичный воздух подавался в горелки подогретым до 140—120°. Нагревание вторичного воздуха происходило в электрическом нагревателе.

Тепловое напряжение топки (объем жаровой трубы) во время опытов составляло 340—570 *т · кал/м³ч*. При этих нагрузках топочного пространства $\alpha_т$ составляла 1,1—1,15, а максимальная темпера-

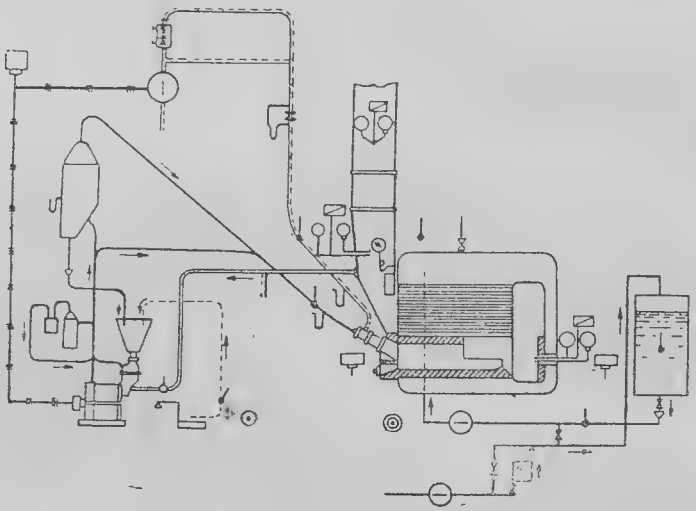


Рис. 317. Схема опытной пылеугольной установки шотландского котла 96 *м²* и расположение измерительных приборов при испытании.

тура топки доходила до 1500°. Зола и шлак, выпадающие на кирпичный под топки, из-за высоких температур превращались в жидкое состояние, что позволяло осуществлять жидкое шлакоудаление.

Кроме того, при наличии в топке жидкого шлака выпадающие на под недогоревшие частицы угля успевали там полностью выжигаться, что подтверждается анализом спускаемого из топки жидкого шлака. По данным анализа содержание горючих в нем практически равно нулю. Опыты по пылесжиганию в рассматриваемой установке закончились полным успехом: к. п. д. котла колебался в пределах от 72,5 до 76,5%.

Для сравнения полученных результатов работы опытной пылеугольной установки, на этом же котле были проведены опыты по сжиганию углей марки ГО и Т на ручной решетке (табл. 113а). К. п. д. котла при слоевом сжигании углей ГО и Т составлял 48—63,5% против 72,5—76,5% при пылеугольном отоплении.

Таблица 113а

Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов		
			1	2	3
Продолжительность		час.	8,15	8	6,25
Топливо					
Род угля			ГО	ГО	Т
Сорт угля			курной	курной	тощий
Низшая теплотворная способность рабочего топлива	$Q_н^р$	*кал/кг*	6497,5	6237	6848
Часовой расход топлива . .	B	*кг/ч*	139	150	206,0
Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	*кг/м²ч*	103,7	112,0	153,8
Видимое тепловое напряжение	$\frac{Q}{R}$	*т·кал/м²ч*	673,0	696,0	1050
Видимое тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	*т·кал/м³ч*	810,0	848,0	1266,0
Толщина слоя топлива, число загрузок в час	$S_{сл}$	*мм*	150	150	150
Вода и пар					
Видимая испарительность топлива для всей установки	$И_в$	*кг/кг*	6,67	5,90	5,345
Видимое паронапряжение поверхности нагрева котла .	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	19,3	18,95	22,9
Температура воздуха в котельной	$t_в$	°Ц	33,9	48,0	51,9
Температура воздуха, поступающего в топку	$(t_в)'_т$	°Ц	33,9	48,0	51,9
Газы					
Температура газов за котлом	$(t_2)''_к$	°Ц	329,5	354,8	391,0
Состав газов за котлом . .	$(RO_2)''$	%	13,7	13,80	12,58
Состав газов за котлом . .	$(RO_2 + O_2)_к$	%	18,43	19,23	18,7
Содержание окиси углерода за котлом CO	$(CO)''_к$	%	1,21	1,30	1,345
Тепловой баланс котла					
1 *кг* топлива вносит в топку		%	100	100	100
Используется котлом	$\eta_к$	%	63,5	59,0	48,3
Теряется с уходящими газами	q_2	%	13,0	13,165	17,68
Теряется от химической неполноты сгорания	q_3	%	7,4	3,82	5,35
Теряется от механической неполноты сгорания . . .	q_4	%	14,1	21,5	26,67
Теряется в окружающую среду	q_5	%	2,0	2,0	2,0

ВЫВОДЫ

1. Первая попытка сжигания угля в виде пыли была сделана Нейнсом еще в 1818 г.

2. Практические достижения в работе над пылеугольным отоплением начинаются лишь с 90-х гг. XIX в.

3. Пылеугольное отопление судовых котлов началось со времени империалистической войны 1914—1918 гг.

4. В процессе эксплоатационных и опытных наблюдений выработались три системы применения пылеугольного отопления на судах:

а) центральная — одна мельница обслуживает несколько котлов;

б) индивидуальная — одна мельница обслуживает одну горелку;

в) кольцевая — одна мельница обслуживает топки одного котла.

5. В судовых установках наилучшей оказалась кольцевая система пылесжигания. В сравнении с другими системами она наиболее надежна в работе, имеет небольшой вес и габаритные размеры и работает с более высокими к. п. д.

6. Пылеугольное отопление судовых котлов в сравнении с сжиганием топлива на механических решетках имеет ряд преимуществ:

а) возможность достигнуть более полной механизации обслуживания топки,

б) малая тепловая инерция топки,

в) возможность быстрой разводки и прекращения паров в котле

7. Применение пылеугольного отопления на судах капиталистических стран в основном вызывается только стремлением получить побольше прибылей за счет уменьшения расходов на топливо и рабочую силу.

8. Пылеугольное отопление в Советском Союзе дает возможность освобождать высокоценные угли для нужд бурно растущей углехимической и металлургической промышленности. Наряду с этим пылеугольное отопление дает возможность сжигания низкосортных углей с одновременным повышением к. п. д. и нагрузки котлов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К VIII ГЛАВЕ

1. Блейтбрей. Топки для пылевидного топлива, перев. с нем. инж. Дютель А. А. под ред. Уманского А. П., М.-Л., 1932.

2. Грановский Р. Г. Котельные установки. М.-Л., 1933.

3. Гусев С. В. Судовые паровые котлы. Ленинград, 1934.

4. Мюнцингер. Пылесжигательные топки в стационарных паровых котлах. Перев. с нем. инж. Темкина В. А. М.-Л., 1925.

5. Немировский Н. А. и Пьянов П. В. Механизация сжигания топлива на морских судах. 1932.

6. Немировский Н. А. Пылеугольное отопление на судах. М.-Л., 1932.

7. Сурвилло. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы. ГНТИ, 1931.

8. Титов П. И. Судовые механизмы. Л.-М., 1933.

9. Темкин. Новейшие достижения в сжигании пылевидного топлива.

10. Хаслам Р. Г. и Руссель. Топливо и его сжигание. Перев. с англ. Калистратов. М.-Л., 1934.

11. Шорин С. Н. Пылеугольное отопление паровых котлов. М.-Л., 1933.

12. Немировский. Технико-эксплоатационные данные судовых пылеугольных установок. Водный транспорт. № 1, стр. 48—53, 1932.

13. Лебедев А. И. и Точилкин Н. М. Размол и подсушка подмосковного угля в тихоходной мельнице Кеннеди. Известия ВТИ, № 2, 1932.

14. Коробцев К. М. и Бражников В. И. Пылеугольное отопление в судовых котельных установках. Труды ВНИТОСС. Т. I, вып. I. стр. 135—155, 1934. То же см. Водный транспорт, № 2 и 4, 1934.

Иностранная литература к VIII главе

1. Ash. Pulverized coal with particular reference to the British merchant service. Journal of commerce, annual review, 1928.

2. Brand. Pulverized fuel to day. Trans. of the institute of engineers and shipbuilders in Scotland. 1929.

3. Brierly. The Todd pulverized coal burner. Test on a Scotch marine boiler. Journal of the American Society of naval engineers, V. XLI, стр. 192—220, № 2, May 1929,

4. Brand J. C. Pulverized fuel for marine purposes. Marine Engineer, p. 286—291, 1927.

5. Brownlie D. Low temperature carbonisation pulverized coal. Shipbuilder. May 1929.

6. Brousse. La chauffe au charbon pulverisé à bord des navires. Bull. Techn. du Bureau Veritas. Juillet 1930.

7. Pulverized coal as marine fuel. Mar. Engineering & Shipp. Age. Vol. 30, № 10, p. 580—81, 1925.

8. Pulverized fuel for marine boilers. Mar. Engineer & Motorshipbuilder. V. 49, № 588, p. 298—300. Aug. 1926.

9. Brand. The pulverized fuel for marine purposes. TINA. Vol. 65, p. 245—274, 1923.

10. Burkhardt. The colliers „Berwindglen" und „Berwindvale". Trans. of the Soc. of Naval Architects and Marine Engineers, N.-Y. Vol. 37, p. 159—167, 1929.

11. Damas J. Ueber Schiffskessel für Kohlenstaubfeuerung. Revue Universelle des Mines. 15/1—31, p. 50—53. То же, Die Wärme. № 2, стр. 30, 1932.

12. Goos E. Kohlenstaubfeuerungsanlage auf dem Dampfer Stassfurt. W. R. H. 1930, стр. 381; Oktober und November 1931.

13. Jefferson and Evans. Test of pulverized coal applied to Scotch marine boilers. The marine engineer, p. 99, 1928. То же см. Engineering 29/XII 1927; 16/XII 1927.

14. Yarrow. Pulverized fuel burning experiments. The marine engineer, p. 380, 1928.

15. The distribution of pulverized coal. The marine engineer. P. 384, 1928.

16. Jasushi Taji. Application of pulverized fuel for marine boilers. Shipbuilder, April 1929.

17. Le chauffage au charbon pulverisé à bord des navires. Chaleur et industrie. P. C., 1929.

18. Pulvereus Nauticus. Une drague marine à charbon pulverisé. Chaleur et Industrie P. C., 1931.

19. Pulvereus Nauticus. Le Donau. Chaleur et Industrie, P. C. 1931.

20. Pulverized fuel progress. Shipb. and Shipp. Rec. February 1932.

21. Jefferson C. J., Evans J. S. and Broschek J. Development of pulverized fuel for marine purposes during 1927—1928. Soc. of Naval Arch. and Marine Engrs, Vol. 36, p. 165—195, 1928.

22. The powdered fuel steam ship „Swiftpool". The Shipbuilder. September 1929.

23. Lorain P. Application de la chauffe au charbon pulverisé aux chaudières marines. Journal de la Marine. March, № 746, p. 1414—16; № 747, p. 1485—86, 1933.

24. Scotch boilers and pulverized coal. Engineer, № 4021, p. 107, 1933.

25. Gibbons W. G. and Arthurson M. Pulverized coal firing in marine Scotch boilers. Inst. of marine engineers, Trans. vol. 45, № 2, March, p. 25—46, 1933. См. также Gibbons W. G. and Arthurson M. Pulverized coal firing in marine Scotch boilers. Engineer, Vol. 155, № 4023, p. 168, 1933.

26. Brousse M. P. Utilisation du charbon pulverisé à bord des navires. Bull. de l'Association technique maritime et aéronautique, № 34, p. 477—524, 1930.

27. Pulverized fuel progress. Marine engineer. March, № 654, 1932.

28. Pulverized fuel firing on Japanese steamers. Engineering, № 3508, p. 377—378—384, April 7, 1933.

29. Brand J. S. Pulverized fuel for marine purposes, TINA, V. 69, p. 245—273, 1927.

30. Hill W. Scott. Powdered coal for ships. TINA. V. 71, стр. 183—195, 1929.

31. Pulverized coal on the „Horoarata". Marine Engineer, P. 19—20, 1929.

32. Pulverized coal burning steam ship „Berwindvale". Mar. Eng. P. 360—361, 1929; p. 250—263, 1931.

33. Todd. Pulverized fuel equipment on the „West Alsek". Mar. Engineer and Motorshipb. P. 360—361, 1929.

34. Pulverized fuel birning steamship „Swiftpool". Mar. Engineer a. Motorshipb. P. 365, 1929.

35. Cans T. S. Pulverized coal applied to Scotch marine boilers. Engineering, № 3231, 1927. То же см. Engineer, № 3753, 1927.

36. Evans and Brierly. Marine development of pulverized coal. Journ. of Amer. Soc. of Naval Engnrs. August 1928.

37. Pulverized coal firing on the „Lorrain" (Todd system). Mar. engineer and Motorshipb. P. 51, 1931.

38. Pulverized coal on the „Hororoata". Mar. Engineer P. 19. 1929. То же см. Bull. Techn. du Bureau Veritas. April 1930.
39. Pulverized coal test results. Shipb. and Shipp. Rec. 30/V 1929.
40. Pulverized fuel development. Shipbuilder, March 1929.
41. Pulverized fuel for cargo. Eng-r. 1/III 1929.
42. Pulverized fuel or mechanical stoking. Mar. Eng-r. and Motorshipb. May 1929. То же см. Shipbuilder, May 1929; Shipb. and Shipp. Rec. 11/IV 1929; 25/IV 1929.
43. Die Sommertagung der Institution of Naval Architects, 1927 in Cambridge. WRH, № 18, p. 355—357, 1927.
44. Stillman Th. B. Pulverized coal tests of a marine watertube boiler. Engineering, № 3232 1927. То же см. NAME, стр. 137—165.
45. Woodeson. Pulverized fuel and its application to ship's boilers. Soc. of consulting marine engineers and ships surveyers. 1928.
46. Peabody E. H. The burning of hydrocarbons under marine boilers. Trans. of the Soc. of Naval Arch. and Marine Engrs. Vol. 36, p. 197—217, 1928.

ГЛАВА IX

СОВРЕМЕННЫЕ СУДОВЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ

210. Повышение требований к судовым водотрубным котлам

Не успели еще забыть об ужасах империалистической войны 1914—1918 гг., как со стороны капиталистических держав начинается подготовка к новой империалистической войне и прежде всего к нападению на СССР. Крупные капиталистические державы соревнуются между собой в вооружении флотов и армий. Появляются мощные быстроходные военные суда. В США построены суда, имеющие мощность в 180 000 *л. с.*, а в Италии спущены на воду суда мощностью в 100 000 *л. с.*, делающие по 42,5 узла.

Для достижения высоких скоростей судов потребовалось дальнейшее повышение требований к судовым котлам. Основные из этих требований:

1) увеличение мощности котлов,

2) повышение паронапряжения,

3) уменьшение веса и габаритных размеров, повышение к. п. д. котлов, увеличение давления пара и температуры перегрева пара.

На ниже описываемых конструкциях будет наглядно показано, каких больших результатов в этой области достигли в настоящее время.

Таблица 114

Наименование	Мощность в *л. с.*	Вес машинной установки в *т*	Число *л. с.* на 1 *т* веса	Расход топлива на 1 *л. с.*
Цилиндрический котел (снабженный воздухоподогревателем и искусственной тягой) . . .	28000	3402	8,23	0,696
Котел Ярроу (снабженный воздухоподогревателем и искусственной тягой)	28000	2345	11,94	0,604
Цилиндрический котел (снабженный воздухоподогревателем)	67500	7010	9,63	0,655
Котел Ярроу (снабженный воздухоподогревателем)	67500	4580	14,75	0,569
Цилиндрический котел (снабженный воздухоподогревателем и искусственной тягой)	183000	16760	10,92	0,622
Котел Ярроу	183000	10000	18,30	0,569

За последние 10—15 лет весьма сильно возросли требования к повышению к. п. д. силовой судовой установки. Отчасти эти требования были продиктованы стремлением пароходовладельцев повысить свои прибыли за счет стоимости сэкономленного топлива. Большого успеха в выполнении этого требования добилась фирма Ярроу. Применением пара повышенного давления и воздухоподогревателей ей удалось повысить к. п. д. как силовой установки в целом, так и котельной установки в частности.

По данным, приведенным на сессии Institution of naval architects 2 июля 1931 г.[1] (табл. 114), расход нефти на 1 *л. с. ч* в новых котлах Ярроу с повышенным давлением колеблется в пределах 0,569—0,604 *кг/л. с. ч* против 0,622—0,696 у цилиндрических котлов.

Основные характеристики сравниваемых здесь котлов даны в нижеследующей табл. 115.

Таблица 115

Наименование	Обозначение	Размерность	Двойной шотландский котел, снабженный воздухоподогревателем и перегревателем	Котел Ярроу 5-коллекторный с воздухоподогревателем и искусственной тягой
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	10.5	31.6
Температура перегретого пара .	$(t_{пе})_{ср}$	°Ц	343	400
Температура воды, поступающей в котел	$t_к'$	°Ц	127	149
К. п. д. котла	$\eta_к$	%	80	85

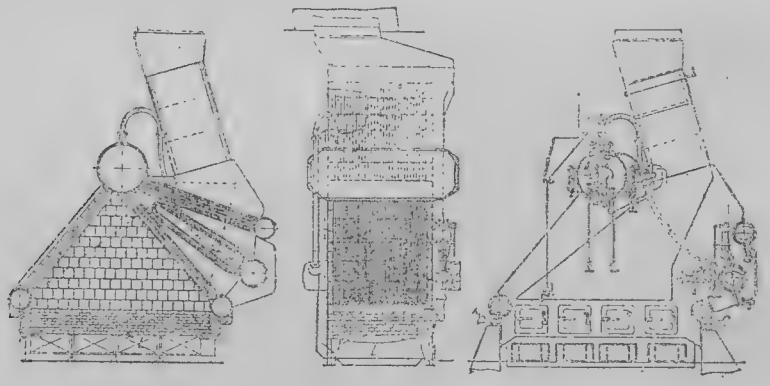


Рис. 318. Котел Ярроу повышенного давления.

211. Котлы Ярроу повышенного давления

Котлы Ярроу повышенного давления[2] (рис. 318) получили первое применение на пароходе «King Georg V», построенном в 1926 г.

[1] Marine engineer & Motsh. Builder. Стр. 265, 1931.

[2] Англ. пат., № 144167, 1919 г.; № 209940, 1923 г.; № 316058, 1928 г.; № 204545, 1922 г.

Перегреватель в котле Ярроу помещен между двумя пучками кипятильных труб. Такое расположение пароперегревателя выгодно. Благодаря большой разнице температуры газов и пара в перегревателе поверхность его нагрева получается меньше. В целях сохранения традиционной прямизны кипятильных труб два пучка их, охватывающие пароперегреватель, раздвинуты на сравнительно большой угол.

Другой отличительной особенностью этого котла является направление дымовых газов только в одну сторону, а также применение цилиндрических водяных коллекторов. Последнее было вызвано стремлением уменьшить толщину стенок коллекторов и повысить их прочность в связи с переходом на повышенное давление пара. В хвосте котла расположен трубчатый воздухоподогреватель.

Основные характеристики рассматриваемого котла приведены в табл. 116.

Таблица 116

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Год постройки			1926
2	Мощность механизмов	$N_э$	*л. с.*	3500
3	Давление в котле	$P_к$	*ати*	38
4	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	435
5	Число котлов			2
6	Паропроизводительность одного котла	D	*т/ч*	7,7
7	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	237
8	Поверхность нагрева котла пароперегревателя и воздухоподогревателя	$H_{к+пе+в.\ п}$	»	526
9	Диаметр кипятильных трубок	d	*мм*	35
10	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	млн. *кал/$м^3$ч*	0,44
11	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/$м^2$ч*	32,5
12	Паронапряжение всей поверхности нагрева	$\frac{D}{H_{к+пе+в.\ п}}$	»	14,7
13	Вес котла, готового к эксплоатации, включая обмуровку, кожухи и воздухоподогреватель, на 1 *т* производимого пара	$\frac{G_{к+в.\ п}}{D}$	*т/т*	5,2

Испытание котлов на пароходе «King Georg V» закончилось вполне успешно. После этого новыми котлами Ярроу было снабжено несколько крупных пароходов торгового флота (рис. 318а). Эксплоатационная проверка работы котлов Ярроу и на этих пароходах закончилась успешно.

Ниже мы приводим табл. 117 и 118 основных эксплоатационных и конструктивных характеристик котлов Ярроу в том виде, как они даны самим Ярроу [1].

[1] Yarrow H. E. Water tube boiler in some recent ships with service results. TINA. Стр. 189—194, 1931. (Дискуссия, стр. 194—198).

Таблица 117

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Название судов					
				„Beaver“	„Vicercy of India“	„Duchess of Richmond“	„Prince Henry“	„Empress of Japan“	„Strathnaver“
1	Число котлов Ярроу			4	6	6	6	5	4
2	Суммарная поверхность нагрева котлов	$\Sigma H_к$	$м^2$	1170	3010	3005	2535	4920	4640
3	Суммарная паропроизводительность котлов	ΣD	$кг/ч$	29030	81647	73000	64500	12000	12500
4	Паропроизводительность одного котла	D	„	7250	13600	12200	10200	20000	31200
5	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	24,7	27,1	24,4	25,4	24,4	26,85
6	Давление пара в котле . . .	$P_к$	$ата$	18,4	28,12	26,01	26,01	29,66	29,66
7	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	345	372	385	357	385	385
8	Температура воды, поступающей в котел	$(t_в)_к'$	°Ц	150	150	150	150	150	178
9	Расход топлива	B	$кг/ч$	3900	5640	5260	4340	8320	8130
10	Теплотворная способность топлива	$Q_н^р$	$кал/кг$	6100	10500	10500	10500	10500	10500
11	Тепловое напряжение поверхности нагрева котла .	$\frac{Q}{H_к}$	$кал/м^2ч$	14300	14200	12850	13300	12900	13350
12	К. п. д. котла гарантированный	$(\eta_к)_г$	%	80	84	82	85	85	86
13	К. п. д. котла по опытам . .	$(\eta_к)_{оп}$	%	83	87	85,5	—	88	—
14	Топливо			уголь	мазут	мазут	мазут	мазут	мазут

К. п. д. котлов, получаемый во время эксплоатации, держался на уровне 83—88%. Особенно большие успехи при постройке котлов Ярроу были достигнуты в области уменьшения площади, занимаемой котельными (табл. 118).

Отношение площади, занимаемой котельной, к суммарной часовой паропроизводительности на двух крейсерах было доведено до 0,58—0,85 против 7,4—5,6 *м²/т*. Данные этой же таблицы указывают на весьма большие успехи фирмы Ярроу и в области повышения $\frac{D}{H_к}$, а именно на крейсере и эсминце по данным табл. 118 $\frac{D}{H_к}$ удалось повысить до 85 *кг/м²ч*.

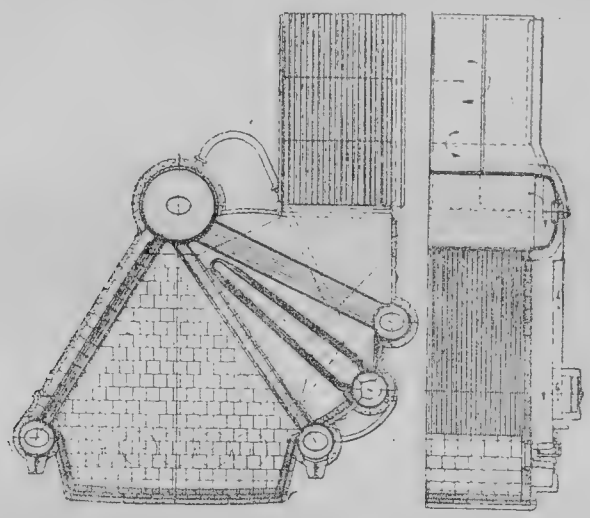


Рис. 318а. Вторая конструкция котла Ярроу повышенного давления.

Наряду с преимуществами рассматриваемый котел Ярроу имел недостатки. Главные из них:

1) сравнительно высокий вес котла. Так, например, вес котлов Ярроу, работающих на коммерческих судах, по данным табл. 118, колеблется в среднем в пределах от 10 до 5,3 *кг/т* пара;

2) невозможность заполнить водой перегреватель вследствие расположения его петлей вверх. Это могло вызвать коррозию трубок перегревателя во время бездействия котла, а при ускоренной разводке паров всегда имелась вероятность перегрева трубок пароперегревателя.

Эти недостатки пароперегревателей были исправлены лишь в нижеописываемых котлах новейшего адмиралтейского типа.

212. Котлы Ярроу новейшего английского адмиралтейского типа

Адмиралтейский тип котла Ярроу[1] довоенной постройки отличался от предыдущих его конструкций расположением пароперегревателя в хвосте котла. Эксплоатационные и опытные наблюдения

[1] Dight. Опыты и заводские испытания судовых водотрубных котлов; TINA. Стр. 171—199, 1933. Англ. пат., № 263069, 1926 г.

Таблица 118

№ по порядку	Наименование	Обозначение	Размерность	Название судов: „Duchess of Atholl", „Duchess of Bedford"	„Blaverford", „Blaverdale", „Blaverburn"	„Viceroy of India"	„Duchess of Richmond", „Duchess of York"	„Empress of Japan"	„Empress of Britain"	„Prince Henry", „Prince Robert", „Prince David"	„Strathnaver", „Strathaird"	„Carthage", „Corfu"	„Rongatira"	Крейсер	Эсминец	„Bremen"	„Statengana"	„Rajputana"
1	Система котлов			Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	Ярроу	треугольного типа	B и W	шотл.
2	Число котлов			6	4	6	6	6	8	6	4	4	6	6	3	20	6	6
3	Суммарная поверхность нагрева	$\Sigma H_к$	$м^2$	2852	1170	3012	3000	4910	9250	2530	4640	2340	2560	6860	2050	17050	3980	3570
4	Поверхность нагрева одного котла	$H_к$	„	475	292	502	500	817	1160	411	1140	585	426	1150	684	—	664	595
5	Суммарная паропроизводительность	ΣD	$кг/ч$	69500	29030	81700	73000	119400	225000	64500	124500	62500	68500	560000	175000	400823	95250	104320
6	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	24,4	24.7	27,1	24,4	24,4	24.4	25,4	26.85	26,85	26,85	82	85,5	23,9	23,9	29,3
7	Вес котла, пароперегревателя, воздухоподогревателя с водой в котле	$G_{к.\ у.+в}$	$т$	500	292	500	522	1026	1872	457	900	392	480	390	165	—	744	900
8	Вес котла, пароперегревателя, воздухоподогревателя с водой на 1 $т$ пара	$\frac{G_{к.\ у.+в}}{D}$	$т/т$	7,2	10.03	6,12	7,16	8,6	8,33	7,1	7,23	6,27	7	0,697	0,943	—	7,8	8,62
9	Площадь, занимаемая котельными отделениями	$S_к$	$м^2$	388	218	348	388	398	717	300	326	258	260	325	148	254	398	450
10	Площадь, занимаемая котельными отделениями, на 1 $т$ пара .	$\frac{S_к}{D}$	$м^2/т$	5,6	7,5	4,3	5,3	3,33	3,18	4,65	2.62	4,17	3,8	0,58	0,85	3,84	4,18	4,3
11	Данные таблицы получены на основании .			По эксплоатационным наблюдениям					по конструктивным расчетам	по эксплоатационным наблюдениям	по конструктивным расчетам			по эксплоатационным наблюдениям				

над работой котлов Ярроу этого типа показали, что, благодаря применению пароперегревателя, представлялась возможность повышать к. п. д. как машинной, так и котельной установки.

Наряду с этим практика показала невыгодность расположения пароперегревателя в хвосте котла. Получались значительные колебания температур перегрева пара при изменении нагрузки котла. При форсированной работе котла температура пара возрастала весьма высоко. Слишком высокий перегрев пара создавал угрозу поломки турбины из-за чрезмерного теплового расширения ее частей. Наоборот, при низкой нагрузке котла перегрев пара получался значительно меньше требуемого, вследствие чего турбина работала с пониженным к. п. д.

При размещении пароперегревателя в хвосте котла поверхность нагрева его получалась большой, что объясняется малой разницей температур пара и газа.

Для уменьшения всех перечисленных недостатков некоторые изобретатели предложили размещать пароперегреватель перед пучком кипятильных труб. Осуществление этого предложения дало возможность значительно уменьшить поверхность нагрева пароперегревателя. Разница температур пара и газов при расположении перегревателя в топке была в несколько раз больше, чем в хвостовом перегревателе. Постановка перегревателя в топке создала опасность пережога его трубок, так как температура газов, омывающих трубки перегревателя, была примерно в два раза больше, чем при установке перегревателя в хвосте котла. Перегрев пара попрежнему менялся с изменением нагрузки. Разница заключалась лишь в том, что изменение перегрева (рис. 319) носило обратный характер. С повышением нагрузки температура пара понижалась, и, наоборот, перегрев пара возрастал с понижением нагрузки. Количество теплоты, передаваемое излучением поверхностям нагрева, расположенным в топке, по своей абсолютной величине изменялось в значительно меньших пределах, чем сама нагрузка котла. Разное количество пара, воспринимая излучением примерно одинаковое количество тепла, имело разный перегрев его. При недогрузке котла получался высокий перегрев и при перегрузке, наоборот, низкий.

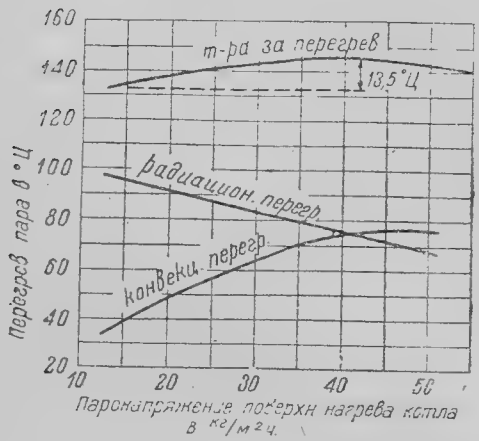


Рис. 319. Перегрев пара в радиационном и конвекционном перегревателе в зависимости от паропроизводительности котла.

Обратный характер изменения перегрева пара в зависимости от нагрузки котла при расположении перегревателя перед и за пучком кипятильных труб привел к мысли расположить пароперегреватель непосредственно в пучке труб. Предполагалось, что температура перегрева пара здесь будет меняться незначительно с изменением нагрузки котла. Для проверки этого предположения были проведены обстоятельные испытания котла Ярроу с пароперегревателем, расположенным в пучке кипятильных труб. На рис. 320 показан котел, на котором производились испытания. Здесь 4, 5, 6 и 7 ряды кипятильных труб удалены, а на место их поставлен пароперегреватель.

Отверстия, полученные после выемки трубок в коллекторах, были заглушены пробками. Пароперегреватели устанавливались симметрично с обеих сторон котла. Состояли они из U-образных трубок, развальцованных в прямоугольных стальных коллекторах. Последние (рис. 320) соединялись трубами с паровым коллектором и главным

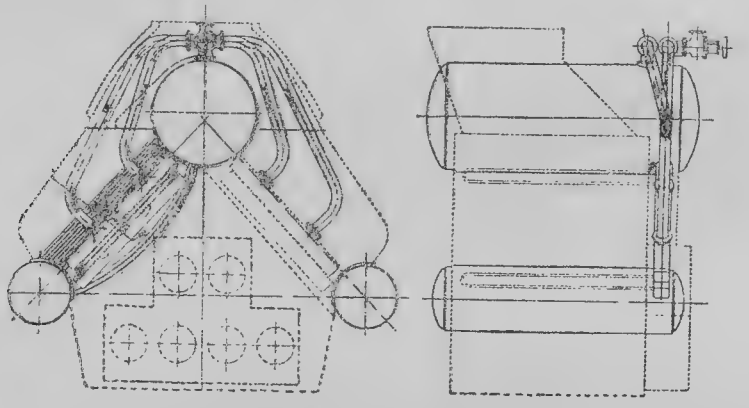


Рис. 320. Экспериментальный котел Ярроу новейшего адмиралтейского типа.

стопорным клапаном. Благодаря расположению пароперегревателя за третьим рядом кипятильных труб, была меньшая опасность перегрева труб перегревателя, так как они защищались от действия пламени кипятильными трубками.

Температура газов перед пароперегревателем не поднималась выше 860° Ц. За перегревателем находилось еще 10 рядов кипятильных трубок. Всего в котле оставалось 13 рядов кипятильных труб против 17 рядов до постановки в него пароперегревателя.

Поверхность нагрева котла была уменьшена за счет удаления четырех рядов трубок с 325 до 255 $м^2$. Наружный диаметр у двух внутренних рядов трубок равнялся 38,1 *мм*, а у остальных трубок наружный диаметр равнялся 28,6 *мм*. Объем топочного пространства у испытуемого котла составлял 10,4 $м^3$.

Во время испытания котел отапливался нефтью. Последняя подавалась в топку через 6 форсунок с нормальной часовой произво-

Таблица 119

Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов					
			1	2	3	4	5	6
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	16,87	16,87	16,87	16,87	16,87	16,87
Сожжено нефти за час	B	*кг/ч*	370	565	800	1065	1370	1600
Количество нефти, сожженной на 1 $м^2$ пов. нагрева котла	$\frac{B}{H_к}$	*кг/м²ч*	1,28	1,85	2,77	3,70	4,62	5,56
Температура питательной воды	$(t_в)'_к$	°Ц	10,5	10,0	10,5	10,0	10,5	11,2
Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	348	357	370	383	385	393

Таблица 120

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов					
				7	8	9	10	11	12
1	Продолжительность испытания	Z	час.	1	2	2	2	2	2
2	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	16,87	16,87	16,87	16,87	16,87	16,87
3	Давление пара в пароперегревателе	$P_{пе}$	*ати*	16,87	16,87	16,77	16,7	16,45	16,21
4	Температура пара за пароперегревателем	$(t)''_{пе}$	°Ц	295	304	318	335	350	363
5	Перегрев пара	$\Delta t_{пе}$	°Ц	90	97	113	128	146	160
6	Испарено воды в час	D	*кг/ч*	1870	3600	7350	10700	14300	17300
7	Температура питательной воды	$(t)'_к$	°Ц	11	9,5	10	10	8,4	10
8	Испарено стандартного пара ($\Delta i = 640$ *кал/кг*)	$D_{ст}$	*кг/ч*	2085	4030	8350	12250	16600	20200
9	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	6,7	13	26,4	38,5	51,4	62
10	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_{ст}}{H_к}$	»	7,5	14,5	30	44	60	73
11	Сожжено нефти на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{B}{H_к}$	»	0,537	1,04	2,1	3,65	4,83	6,25
12	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	*т · кал/м³ч*	161	310	638	1000	1450	1874
13	Видимая испарительность топлива	$И_в$	*кг/кг*	12,5	12,5	12,6	10,5	10,6	9,9
14	Нормальная испарительность топлива	$И_н$	»	14	14,0	14,3	12	12,4	11,7
15	Давление воздуха	ΔS	*мм* вод. ст.	3,8	4,8	9,4	20,6	43,2	76,2
16	Температуры газов								
	средние из 6 точек								
	а) Перед воздухоподогревателем	$(t_г)'_{в.п}$	°Ц	371	486	692	740	848	865
	б) За воздухоподогревателем	$(t_г)''_{в.п}$	°Ц	338	420	550	580	700	718
	в) В дымовой трубе	$(t_г)_{д.т}$	°Ц	223	324	355	435	516	554
17	Содержание CO_2 в газах	CO_2	%	10,12	10,44	11,7	10,9	10,75	10,76
18	К. п. д. котельной установки	$\eta_{к.у.}$	%	77,48	77,82	78,44	74,0	69,65	65,09

дительностью 270 *кг*. Испытания производились на испытательной котельной станции завода B и W в Renfrew. Основные замеры — расходы топлива и пресной котельной воды — производились с особой тщательностью. Ниже мы приводим результаты испытания этого котла (табл. 119), которые подтвердили предположение, что температура пара с изменением нагрузки мало изменяется.

Образцы труб пароперегревателя, вырезанные после испытания, показали, что стенки труб не подвергались разрушению. Для большей осторожности было решено уменьшить температуру газов в перегревателе, для чего перед ним поставили еще один ряд кипятильных труб. Таким образом, трубный пучок перед перегревателем состоял уже из четырех рядов труб.

Поверхность нагрева котла за счет постановки четвертого ряда труб увеличилась с 255 до 278 *м*².

После постановки четвертого ряда труб котел снова подвергся испытаниям, результаты которых приведены в табл. 120.

Данные табл. 120 указывают на большие, чем в предыдущих опытах, пределы колебания температур перегретого пара. Но тем не менее перегрев пара даже при сравнительно низких нагрузках котла получался довольно высоким (90° Ц).

После испытаний снова были вырезаны образцы труб перегревателя. При тщательном их осмотре следов разрушения не обнаружили. Трубки и их опоры даже не получили искривления.

Наряду с этими испытаниями были проведены чрезвычайно интересные наблюдения над влиянием уровня воды в паровом коллекторе на перегрев пара. Опыты производились при полной нагрузке и при постоянном расходе нефти, паропроизводительности, давлении пара и т. п. Во время каждого испытания уровень воды в водомерном стекле поддерживался на одинаковом положении.

Как показали результаты испытания, перегрев пара понижался на 2,2° Ц при каждом повышении уровня воды на 25 *мм*. Когда высота уровня воды в коллекторе была понижена на 50 *мм* ниже средины водомерного стекла, то дальнейшее понижение уровня воды оказывало меньшее влияние на перегрев пара.

Первые котлы Ярроу, снабженные новыми перегревателями, были построены для английских линкоров «Нельсон» и «Родней».

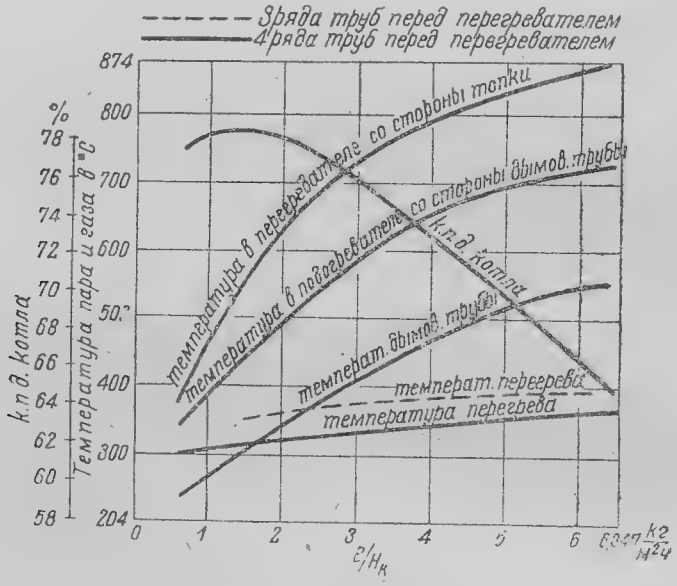
Перед постановкой котлов на суда фирма произвела на заводском станде испытания двух котлов. Испытания дали много ценных указаний на необходимость изменений в конструкции котла для улучшения его работы.

Испытаниям подвергли два котла разных размеров Большой имел поверхность нагрева котла в 600 *м*² и перегревателя в 55,8 *м*²; у меньшего котла поверхность нагрева составляла 530 *м*² и пароперегревателя — 49,4 *м*². Котлы обоих размеров имели с каждой стороны по 17 рядов кипятильных труб. Диаметр двух внутренних рядов трубок был равен 44,45 *мм* (1¾″). Остальные трубки котла и перегревателя имели диаметр 28,6 *мм*.

При работе главных механизмов количество насыщенного пара, потребляемое вспомогательными механизмами, было невелико в сравнении с расходом перегретого пара, и, наоборот, при стоянке судов насыщенного пара потреблялось значительно больше, чем перегретого. Небольшое количество пара, пропускаемое в этих случаях через перегреватель, сильно перегревалось. Пар даже не успевал отводить тепло, воспринимаемое трубками перегревателя, что создавало опасность их пережога. Для уменьшения этой опасности было ре-

шено поставить дроссельную шайбу за трубой насыщенного пара между упомянутым патрубком и вспомогательным стопорным клапаном и соединить трубу насыщенного пара с выходным патрубком перегревателя.

Одновременно предохранительный клапан на перегревателе устанавливался на более низкое давление, чем предохранительный клапан на коллекторе. Благодаря применению дроссельной шайбы давление пара за перегревателем было немного больше давления пара за шайбой. Разница давлений колебалась в зависимости от расхода насыщенного пара: при большом расходе она возрастала, а при малом, наоборот, падала.



Съем пара с 1 м² пов. нагр.			Количество перегрет. пара в % от насыщ.	Длина между трубными досками в мм	Объем топки в м³
Насыщ.	Перегр.	Общий			
14,4	1,86	17,3	12,8	1930	10,4

Рис. 321. Результаты испытания экспериментального котла Ярроу адмиралтейского типа.

Это вызывало перепуск пара из перегревателя в трубу насыщенного пара. Количество перепускаемого пара изменялось в зависимости от перепада давления, а именно при больших перепадах и при большой производительности насыщенного пара через перегреватель и трубу насыщенного пара пропускалось и большее количество его. В связи с этим угроза пережога перегревателя уменьшалась. При этом получался небольшой перегрев насыщенного пара за счет подмешивания к нему перегретого пара. Малый перегрев пара, идущего на вспомогательные механизмы, не оказывал вредного действия на их работу, а, наоборот, последние повышали свой к. п. д. Всякая попытка вести режим котла при высокой производительности насыщенного пара вызывала подъем предохранительного клапана и увеличивала проток пара через перегреватель, что также уменьшало опасность его пережога.

Результаты испытаний двух котлов приведены на рис. 321. Из рисунка видно, что колебание температуры перегретого пара во время испытаний было велико. Одновременно резко понижался к. п. д. котла при повышении его нагрузки, что следует отнести к недостаткам котла. Во время испытания выяснилось, что выполненные из мягкой стали опоры перегревателя, при повышении температуры газов до 800° Ц, прогибались вследствие ползучести материала.

Острая необходимость применения огнестойких сталей для опор пароперегревателя заставила котлостроительные заводы и научно-исследовательские организации заняться этим вопросом. Задача оказалась относительно нетрудной. После непродолжительной работы заводам удалось изготовить огнестойкие стальные опоры для перегревателей (рис. 322, 322а).

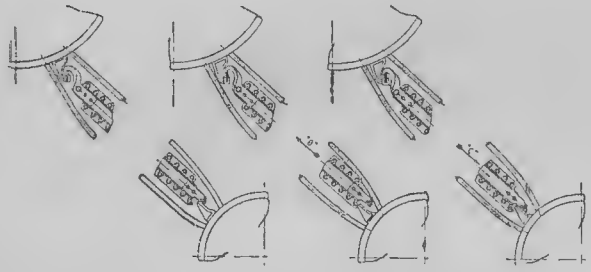


Рис. 322. Опоры пароперегревателя.

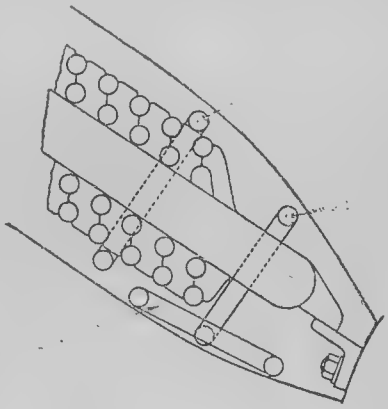
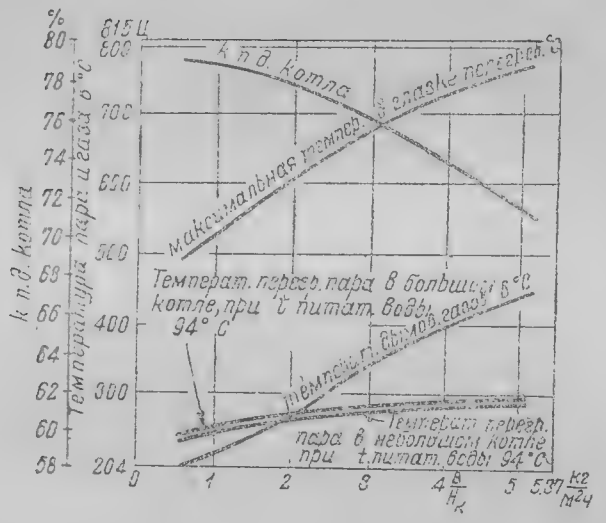


Рис. 322а. Вторая конструкция опор пароперегревателя.

На рис. 323 и 323а приведены основные опытные данные двух испытательных котлов Ярроу, установленных на линкоре «Родней» (рис. 323с) и крейсере «Кент». Из рисунка мы видим, что температура перегретого пара с изменением нагрузки котла колебалась в небольших пределах. К. п. д. котла, наоборот, резко снижался с повышением его нагрузки, что являлось одним из основных недостатков котла. В процессе эксплоатации выяснилось, что первые ряды кипятильных трубок подвергались сильному действию пламени. Удары факелов о кипятильные трубки создавали опасность более быстрого разрушения их. Для уменьшения этой опасности в последующих конструкциях котлов было решено несколько удалить кипятильные трубки от центровых продольных осей форсунок. Для этой цели изгиб трубок перед перегревателем был уменьшен, а трубки котла, расположенные за перегревателем, были несколько изогнуты.

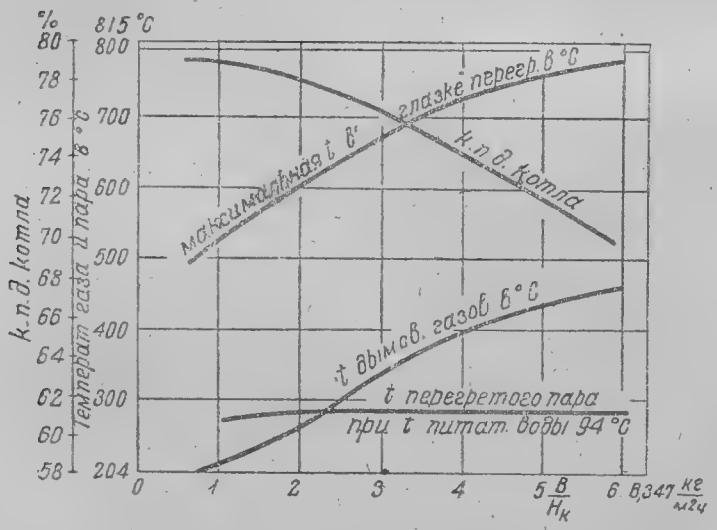
Новые котлы Ярроу с этими изменениями были установлены на четырех крейсерах типа «Sussex» и на двух австралийских крейсерах: «Australia» и «Canberra». Результаты испытания котлов крейсера «Sussex» приведены на рис. 323b.

Эксплоатационные наблюдения над работой котлов показали, что при сильных форсировках трубки перегревателя со стороны топки несколько прогибались от действия высоких температур газов. Для уменьшения температуры газов перед перегревателем в котлах этого типа в дальнейшем ставили 5 рядов кипятильных трубок вместо 4. Такие котлы были поставлены на миноносцах типа «Active» и на



Котел	Съем пара с 1 м² пов. нагр.			Количество перегрет. пара в % от насыщ.	Длина между трубн. досками в мм	Объем топки в м³
	Насыщ.	Перегр.	Общий			
б.	31,5	2,90	34,4	9,3	2,59	22,1
м.	27,9	2,60	30,5	9,26	2,29	20,1

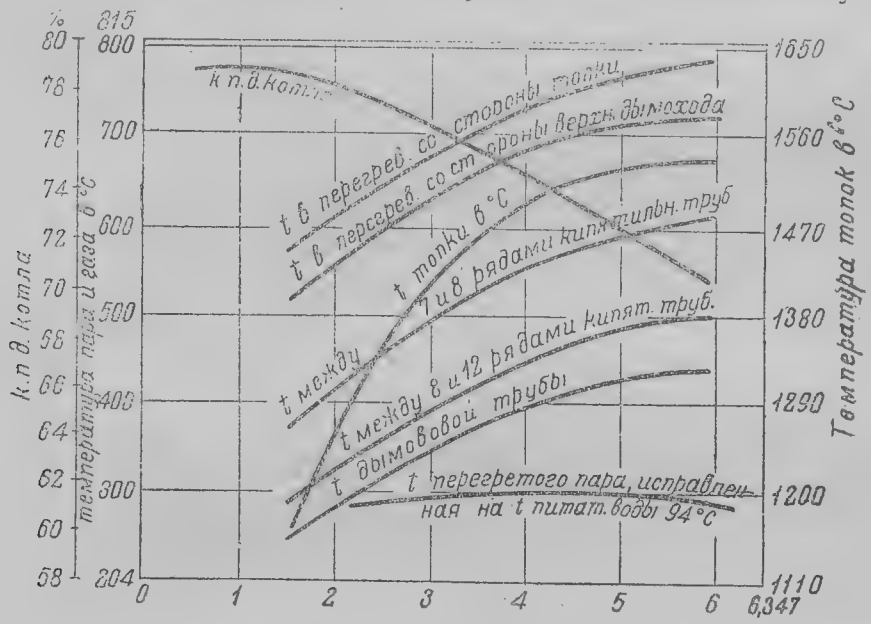
Рис. 323. Результаты испытаний котлов Л. К. „Родней".



Съем пара с 1 м² пов. нагр.			Количество перегрет. пара в % от насыщ.	Длина между трубными досками в мм	Объем топки в м³
Насыщ.	Перегр.	Общий			
37,5	3,7	41,2	9,84	2740	28,6

Рис. 323а. Результаты испытаний котлов крейсера „Кент".

истребителях типа А. Перенесение перегревателя за 5 рядов трубок в новых котлах Ярроу для эсминцев диктовалось еще и тем соображением, что котлы на них должны работать в более тяжелых усло-



Съем пара с 1 м² пов. нагр.			Количество перегрет. пара в % от насыщ.	Длина между трубными досками в мм	Объем топки в м³
Насыщ.	Перегрет.	Общий			
37,8	3,7	41,5	9,8	2750	30,2

Рис. 323b. Результаты испытаний крейсера „Sussex".

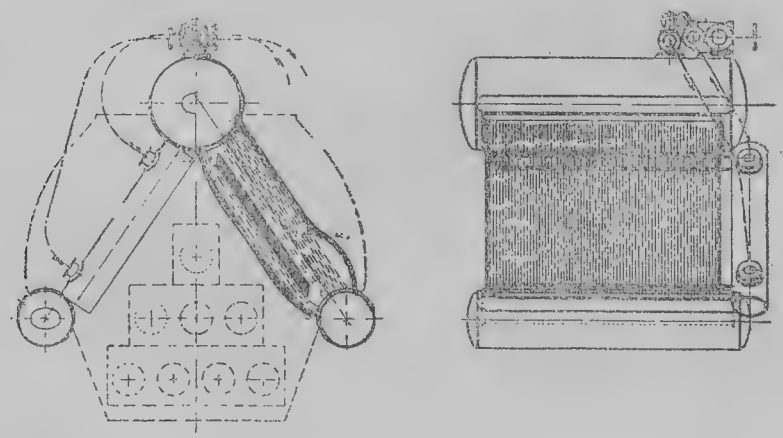


Рис. 323c. Котел линкора „Родней".

виях, т. е. при больших форсировках, чем при работе на крейсерах и линкорах.

Вследствие более низкой температуры газов, омывающих перегреватель, удалось увеличить поверхность его нагрева. Вместо од-

ного ряда U-образных труб, пароперегреватель был составлен из двух рядов таких труб.

Опытные наблюдения над работой ранее рассмотренных котлов показали, что наибольшее содержание CO_2 в дымовых газах удавалось доводить до 9—12%. После ряда усовершенствований в приспособлениях для сжигания нефти удалось содержание CO_2 в уходящих газах довести до 14%. Повышение содержания CO_2 в дымовых газах позволило увеличить к. п. д. котлов. Более подробные

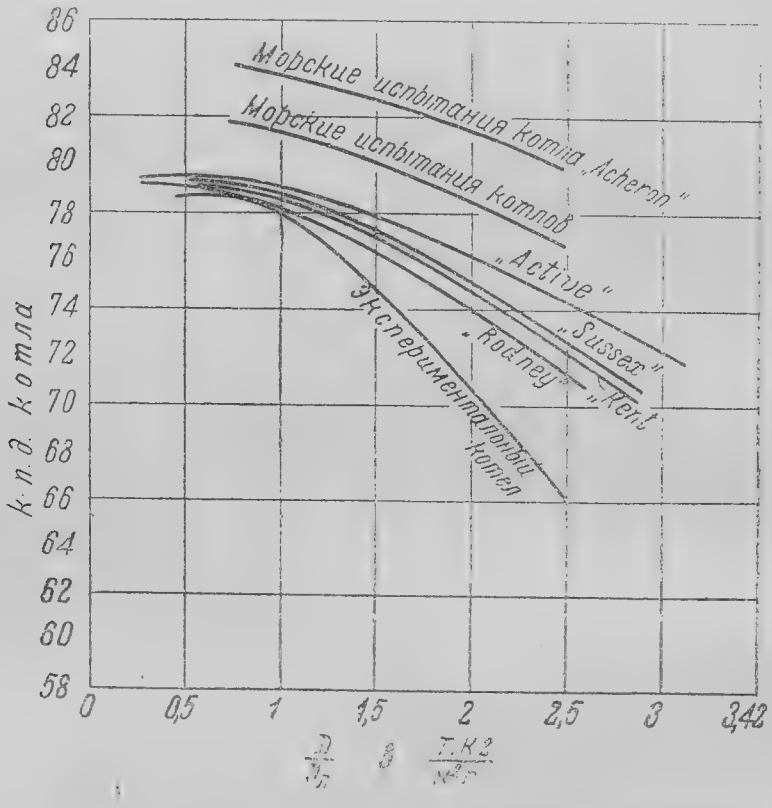


Рис. 324. Сравнение к. п. д. котлов различных кораблей.

данные об изменениях к. п. д. во время испытания приведены на рис. 324. Наиболее высокие к. п. д. котлов были получены при испытаниях котельных установок на эсминце «Acheron», котлы которого показаны на рис. 324а.

Получение высокого к. п. д. у данного котла, помимо хорошего регулирования процесса горения (CO_2 равнялось примерно 14%), достигалось путем постановки в хвосте котла небольшого воздухоподогревателя, понижающего температуру уходящих газов.

В процессе усовершенствований рассмотренных котлов выработался новый тип котлов Ярроу, принятый английским адмиралтейством. Котлы этого типа устанавливались на большинстве военных кораблей, построенных в Англии после войны 1914—1918 гг.

213. Котлы парохода «Bremen»

Котельная установка парохода «Bremen» [1] снабжена водотрубными котлами примерно такой же конструкции, как и котлы Ярроу (рис. 325), адмиралтейского типа. Она рассчитана на часовую паропроизводительность в 500 *т*. Установка состоит из 11 двойных котлов, поверхностью нагрева каждый в 1100 *м*², и 9 ординарных

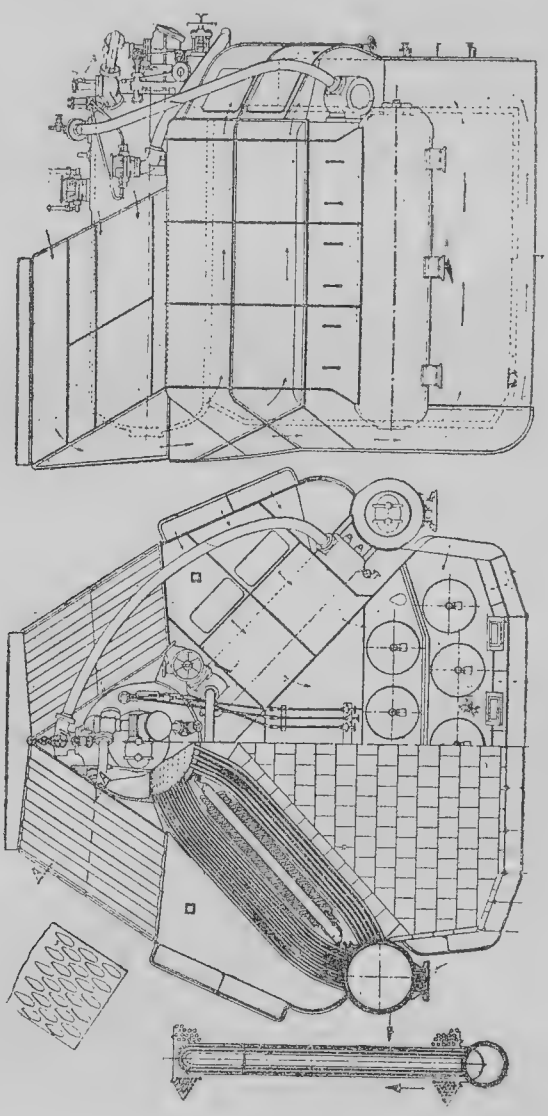


Рис. 324а. Котлы эсминца „Acheron".

котлов поверхностью нагрева в 550 *м*². Суммарная поверхность всей котельной равняется 17 050 *м*². Давление пара в котлах поддерживается равным 23 *ати*. По обеим сторонам парового коллектора в котле расположен трубчатый воздухоподогреватель.

Диаметр парового коллектора равен 1700 *мм*, а водяного — 850 *мм*.

[1] VDI. Стр. 693—708, 1930. Die Maschinen- und Kesselanlagen der Schnelidampfer «Bremen».

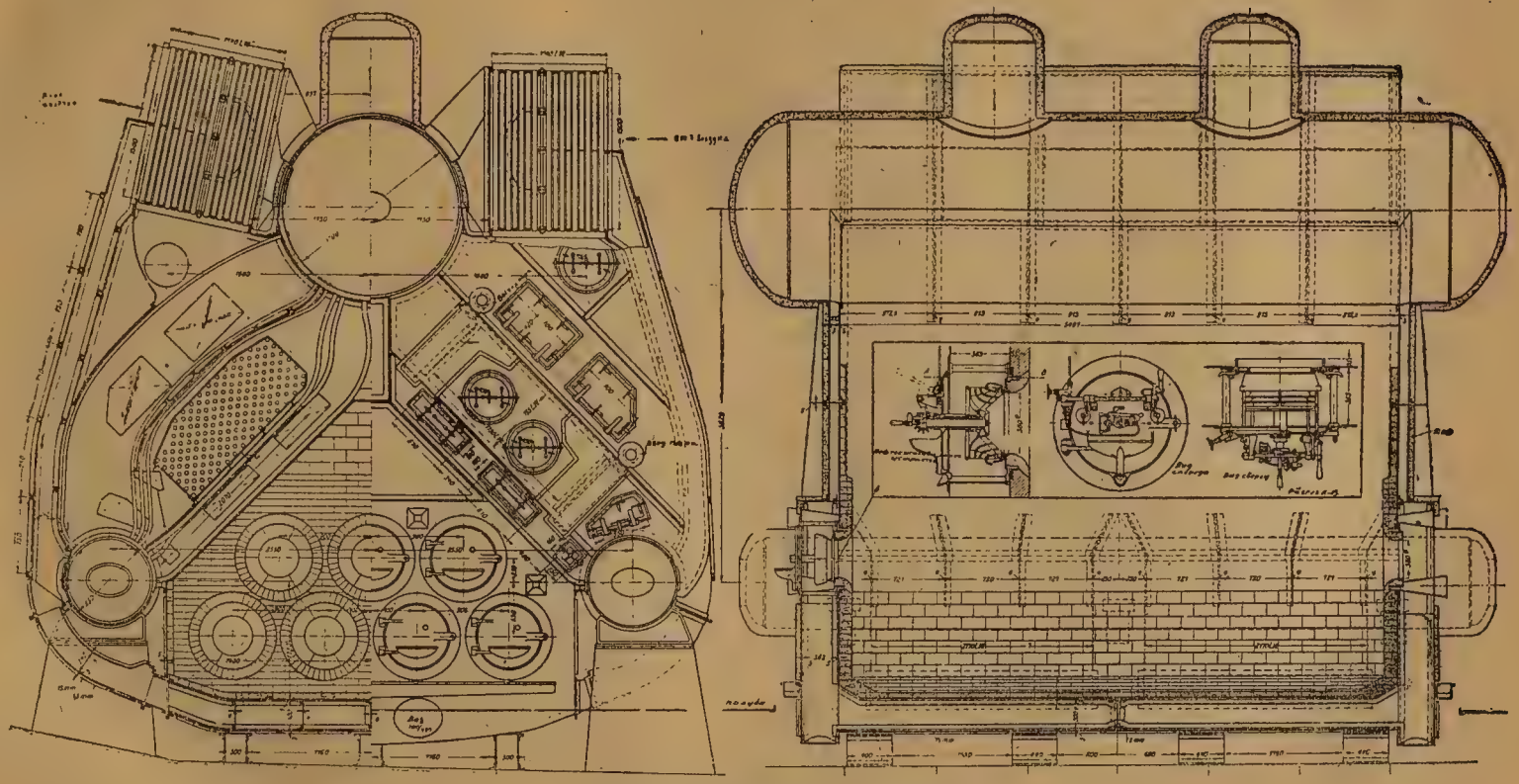


Рис. 325. Котел парохода „Бремен".

Для получения более сухого пара паровые коллекторы двойных котлов снабжались двумя сухопарниками, а ординарные котлы имели только по одному сухопарнику. Для устранения возможности уноса паром воды в пароперегреватель в сухопарниках установлены тангенциальные паросушители.

Пароперегреватели у рассматриваемого котла имеют поверхность нагрева в 250 $м^2$ и состоят из четырех трубных элементов, а у ординарных — из двух. На рис. 326 показаны элементы пароперегревателя. Каждый элемент состоит из 14 трубок, согнутых зигзагообразно. Верхние и нижние концы трубок входят в два коллектора.

Для большей жесткости элементы пароперегревателя укрепляются в специальном каркасе, сделанном из алюминированной литой стали. Крепление трубок перегревателя в каркасе сделано так, что в случае надобности весь элемент можно вынимать.

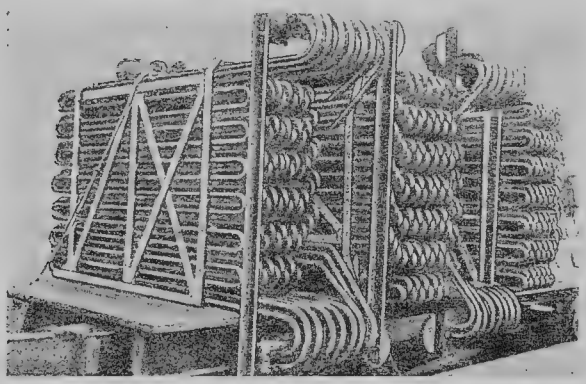


Рис. 326. Пароперегреватель котлов парохода „Бремен".

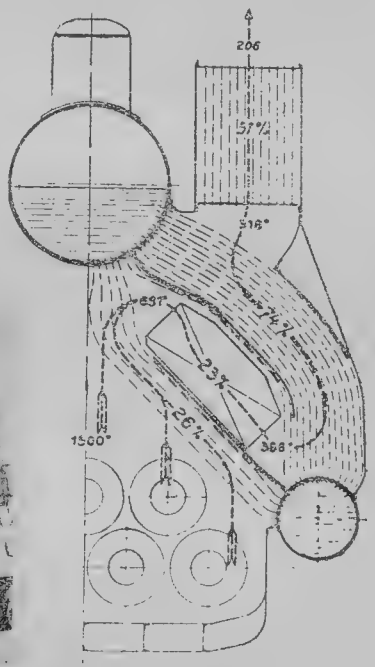


Рис. 327. Схема движения газов в котле парохода „Бремен".

Дымовые газы, проходя через поверхность нагрева, совершают три хода (рис. 327): сначала они поднимаются вверх по переднему пучку труб (первый ход), потом поворачиваются и движутся через перегреватель сверху вниз (второй ход), затем газы снова поворачиваются на 180° и движутся по заднему пучку труб снизу вверх и, наконец, проходят трубчатый воздухоподогреватель. Направление движения пара и газов в перегревателе данного котла носит характер противотока, т. е. свежий пар, поступив сначала в нижний коллектор перегревателя, поднимается затем по трубкам вверх, тогда как газы омывают перегреватель, двигаясь вниз. Как показали опытные и эксплоатационные наблюдения, при движении газа и пара противотоком получаются более высокие коэфициенты теплопередачи.

Воздухоподогреватели у котлов парохода «Bremen» имеют суммарную поверхность нагрева 8786 $м^2$. Воздухоподогреватели у двойных котлов состоят из двух пучков трубок, которые развальцовываются в трубных досках. Поверхность нагрева воздухоподогревателя

двойного котла равна 567 $м^2$. Газы омывают трубки подогревателя изнутри, а воздух — снаружи. У двойных котлов воздух в подогревателе делает два хода: сначала омывает трубки подогревателя над перегородкой (рис. 327), затем поворачивается вниз на 180° Ц и движется по другой половине пучка труб. Из воздухоподогревателя воздух направляется под топку по щелевым каналам, которые расположены по боковым стенкам. Наконец, из подтопочного канала воздух поднимается по фронтовой воздушной коробке в воздухонаправляющие устройства, откуда поступает к форсункам.

У ординарных котлов воздух в подогревателе делает лишь один ход, двигаясь через воздухоподогреватель от фронтовой к задней стенке, где он поворачивается на 90° Ц и опускается вниз по воздушному каналу, расположенному на задней стенке котла. Из заднего канала воздух направляется в подтопочный воздушный канал и затем попадает в воздушную коробку, откуда входит в топку через воздухонаправляющее устройство. Преимуществом такого расположения воздушных каналов является возможность получить экономию в весе воздуховодов (воздуховодами в данном случае служат кожухи котлов). Такое устройство несет за собой и недостаток, а именно трудность осмотра подтопочных воздушных каналов. Кожухи котлов выполнены из литого фасонного железа. Для облегчения осмотра кипятильных трубок отдельные боковые части кожуха выполнены съемными, а передние и задние стенки котла снабжены съемными крышками. Очистка поверхностей нагрева котла, пере-

Таблица 121

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Год постройки			1930
2	Мощность механизмов	$N_э$	*л. с.*	96000
3	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	24
4	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	360
5	Число котлов	—	—	20
6	Паропроизводительность одного котла	D	*т/ч*	17,5
7	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	550
8	Поверхность нагрева котла, перегревателя и воздухоподогревателя	$H_{к+пе+в.п}$	»	953
9	Диаметр кипятильных трубок	d	*мм*	33—43
10	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	млн. *кал*/$м^3ч$	0,64
11	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг*/$м^2ч$	32
12	Паронапряжение поверхности нагрева котла, перегревателя и воздухоподогревателя	$\frac{D}{H_{к+пе+в.п}}$	»	18,3
13	Вес котла с водой, готового к эксплоатации, включая обмуровку, кожух, на 1 *т* пара, производимого в час	$\frac{G_к}{D}$	*т/т*	3,9
14	То же с воздухоподогревателем	$\frac{G_{к+в.п}}{D}$	»	4,4

гревателя и воздушного подогревателя может производиться сжатым воздухом, посредством неподвижного сажесдувателя. Для отоп-

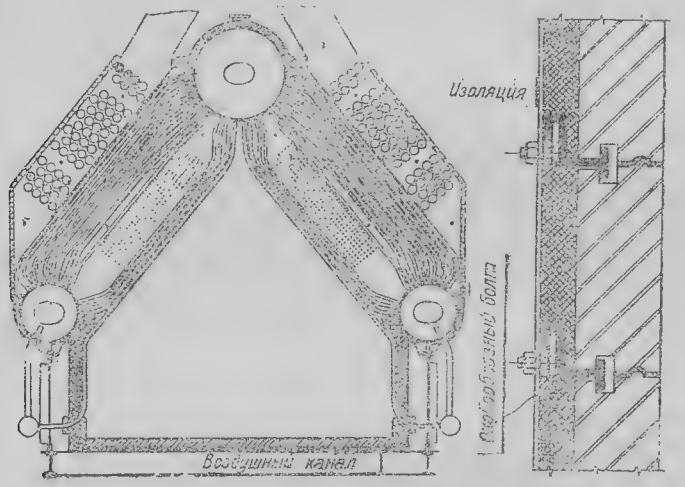


Рис. 328, 329. Котел парохода линии Grace и обмуровка задней стенки по способу „Detrick".

ления двойного котла в его передней и задней стенках установлены по семь форсунок. Каждая форсунка крепится в центре круглой топочной дверцы.

Разбираемый котел оборудован нефтяной топкой системы Вулкан. Каждая воздушная коробка топки снабжена семью круглыми дверцами. Воздух, поступающий в топку, проходит предварительно

Рис. 330. Задняя стенка котла парохода линии Grace.

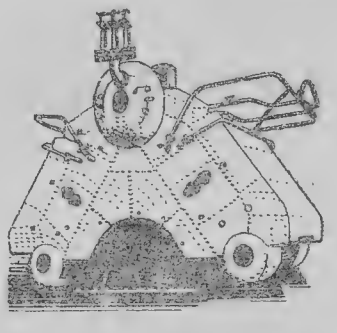


Рис. 330а. Котел типа „Bremen" с изоляцией, окрашенной в белый цвет.

завихривающие лопатки. На рис. 325 показана схема устройства дверец, крепления в них форсунки и завихривающих лопаток.

Котлы снабжены регуляторами питания системы Мумфорд. В табл 121 приведены основные характеристики котлов парохода «Bremen».

Данные таблицы указывают, что при постройке котлов парохода «Bremen» получены большие достижения. Вес котлов и воздухоподогревателей, отнесенный к 1 *т* пара, примерно в два раза меньше веса котлов Ярроу повышенного давления, установленных на коммерческих судах (табл. 118).

Котлы парохода «Бремен» дают и большие паронапряжения $\frac{D}{H_к} =$ $= 32$ *кг/м²ч*, тогда как у упомянутых котлов Ярроу $\frac{D}{H_к} =$ 24—27 *кг/м²ч*.

После получения удовлетворительных результатов работы котлов парохода «Bremen» многие котлостроительные заводы приняли эти котлы за образец для разработки своих новых котлов. Для примера можно указать на котлы (рис. 328), построенные для двух новых американских пароходов линии Grace[1]. Котельная установка судна состояла из четырех водотрубных котлов по 920 *м²* поверхности нагрева в каждом. Из них на поверхность нагрева котла приходилось 460 *м²*, перегревателя — 180 *м²* и экономайзера — 280 *м²*. Общий вес котельной установки составлял 365 *т*. Боковые стенки котлов были покрыты экраном, трубки которого охлаждали кирпичную кладку. Передняя и задняя стенки котла были выполнены из обмуровки по способу Детрика (Detrick) (рис. 329). Стенки пода охлаждались воздухом, подаваемым в топку. Задняя стенка после 1200 часов работы, как видно из рис. 330, почти не имеет разрушения. Небольшим налетом шлака покрыты лишь щели между кирпичами. Котел подвергался испытанию, результаты которого приведены в табл. 122.

Таблица 122

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины	
				Гарантировано	Получено
1	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	30	30
2	Температура воды перед водяным экономайзером	$(t_в)'_{в.эк}$	°Ц	105	105
3	Температура воды за водяным экономайзером	$(t_в)''_{в.э}$	°Ц	150	155
4	Температура перегретого пара . . .	$t_{пе}$	°Ц	400	400
5	Температура уходящих газов . . .	$t_{ух}$	°Ц	160	155
6	Содержание CO_2	CO_2	%	14,75	15
7	К. п. д. котельной установки . . .	$\eta_к$	%	87,5	80

Котел данного типа был установлен также на итальянском пароходе «Rex», построенном фирмой Ансальдо в Генуе. Мощность главных двигателей этого парохода составляла 13 000 *л. с.*, а водоизмещение парохода равнялось 51 000 *т*. Котельная парохода состояла из 12 котлов, из них 8 выполнены с двухсторонним отоплением,

[1] WRH. Стр. 342, 1933; Engineering, № 3507, 3510, 3513, 3516, 1933; Sh. Sh. R. 1933, III, 30, стр. 312—16.

а 4 — с односторонним. Основные размеры поверхностей нагрева котлов приведены в табл. 123.

Таблица 123

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Двухсторонний	Односторонний
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	1470	735
2	Поверхность нагрева перегревателя	$H_{пе}$	»	330	165
3	Поверхность нагрева воздушного подогревателя	$H_{в.п}$	»	980	490
4	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	27	27
5	Температура перегретого пара . . .	$t_п$	°Ц	385	385

Котлы отапливались нефтью, для чего с фронта котла устанавливалось по 9 форсунок. Расход нефти на 1 *л. с. ч* во время сдаточных испытаний — 0,294 *кг*.

На рис. 330 а показан один из котлов типа «Bremen». Изоляция котла окрашена в белый цвет. Это сделано для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду. В настоящее время подобная изоляция делается на большинстве военных судов.

214. Котел Джонсона

Больших успехов в области повышения паронапряжения достиг Джонсон [1], котлы которого установлены на тихоокеанском пассажирском пароходе «Empress of Britain».

Котел Джонсона (рис. 331, 331 а) состоит из двух коллекторов и двух пучков трубок. Диаметр парового коллектора немного больше диаметра водяного коллектора. Кипятильные трубки в котле изогнуты, так что образуют полый цилиндр. Против задней стенки топки установлены два ряда труб. Задняя половина топки разделяется на две камеры двумя рядами труб, расположенными в плоскости коллекторов. Таким образом топка котлов Джонсона представляет собой целиком экранированную камеру. Это позволяет довести тепловое напряжение топочного пространства до 3000 *т · кал/м³ч*.

В конце газоходов установлены заслонки, поворотом которых возможно достигать более равномерного омывания газами поверхностей нагрева, а также и регулировать температуру перегретого пара.

Рассматриваемый котел подвергся тщательным испытаниям под руководством английского адмиралтейства. Основные результаты испытания приведены в табл. 124.

Данные испытания указывают на весьма высокие паронапряжения поверхностей нагрева. Стандартное паронапряжение поверхностей нагрева котла составляло во время опытов 92—108 *кг/м²ч*. Паронапряжение поверхностей нагрева котла и перегревателя было равным 77—90 *кг/м²ч*.

---

[1] Нем. пат., № 586248, 1931 г. Англ. пат., № 288470, 1927 г.; № 303635, 1927 г. The Shipbuilder and marine engine builder. I, № 286, p. 46—48, 1934.

Хорошие характеристики котлов Джонсона дают возможность предполагать, что они в дальнейшем получат широкое распространение во флоте.

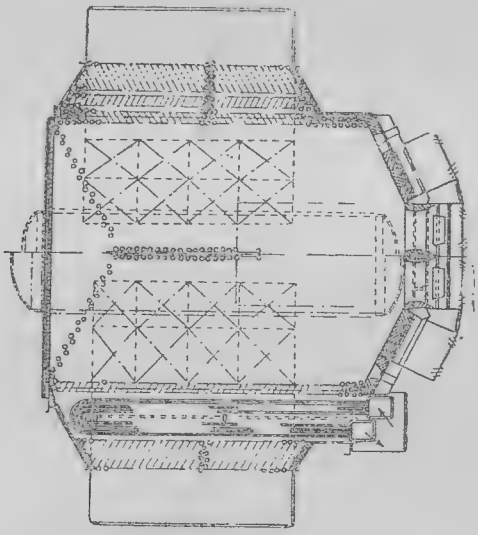


Рис. 331а. Котел Джонсона.

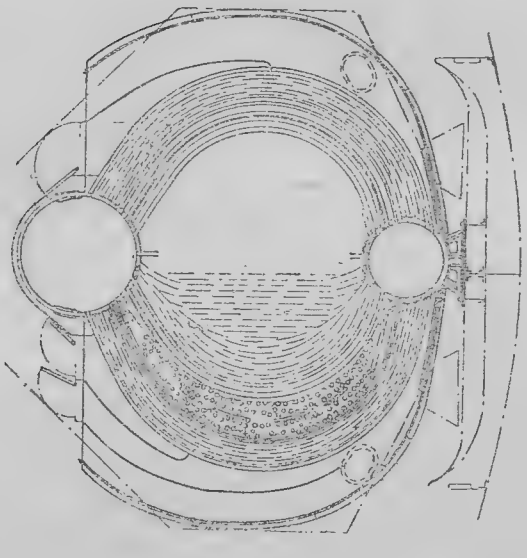


Рис. 331. Котел Джонсона.

215. Котлы Бабкока и Вилькокса повышенного давления и типа SX-экспресс

Большую работу по усовершенствованию своих котлов провела американская котлостроительная фирма Бабкока и Вилькокса.

Она строила их для рабочего давления пара в 40 *ати* и выше. Один из таких котлов показан на рис. 332[1]. Он был установлен на

[1] Англ. пат., № 209940, 1923 г. A. Spyer. The modern developments of the water-tube boiler for marine purposes. TINA. Стр. 196—203, 1929.

Таблица 124

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	№ опытов	
				1	2
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	838	838
2	Поверхность нагрева пароперегревателя	$H_{пе}$	»	168	168
3	Объем топки	$V_т$	$м^3$	25,627	25,627
4	Часовой расход мазута	B	*кг/ч*	6382	7775
5	Число действующих форсунок . . .		—	10	10
6	Теплотворная способность топлива .	$Q_в^р$	*кал/кг*	10600	10600
7	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	$т \cdot кал/м^3ч$	2640	3220
8	Часовая паропроизводительность котла	D	*кг/ч*	75440	67145
9	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	20,4	20,4
10	Температура питательной воды . .	$t_к'$	°Ц	83,8	83,3
11	Температура перегретого пара . . .	$t_{пе}$	°Ц	330	337
12	Испарено стандартного пара ($\Delta i = 640$ *кал/кг*)	$D_э$	*кг/ч*	77300	90300
13	Паронапряжение поверхности нагрева котла видимое	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	90	104
14	Паронапряжение поверхности нагрева котла + перегреватель . . .	$\frac{D}{H_{к+пе}}$	»	75,4	87,1
15	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_с}{H_к}$	»	92,5	108
16	Стандартное паронапряжение поверхности котла + перегреватель . . .	$\frac{D_с}{H_{к+пе}}$	»	77,3	90,3
17	Температура газов у основания дымовой трубы	$t_{ух}$	°Ц	425	471
18	Содержание CO_2 в дымовых газах .	CO_2	%	13,49	13,4
19	К. п. д. котла	$\eta_к$	%	73,4	70
20	Давление воздуха в котельной . . .	$\Delta S_{к-й}$	*мм* вод. ст.	98	143,5
21	Давление воздуха в топке	$\Delta S_т$	*мм* вод. ст.	31	56,4
22	Давление воздуха в дымоходе . . .	$\Delta S_д$	» » »	— 17,8	— 22,9
23	Вес котла на 1 *т* производимого пара	$\frac{G_к}{D}$	*кг/т*	833	714

английском пассажирском пароходе «Георг V» в 1927—28 г. Котел снабжен трубчатым воздухоподогревателем и пароперегревателем. Для большей надежности работы коллектора пароперегревателя сделаны круглыми. Нижние и верхние ряды трубок имеют большой диаметр. Это сделано для улучшения циркуляции воды в котле. В послевоенные годы фирма коренным образом изменила конструкцию своих котлов[1]. Она начала отказываться от применения в них

[1] Англ. пат., № 320683, 320684, 1928 г.; № 339174, 1930 г. Engineering and Boiler House Review, стр. 18—24, июль 1933; King J. H. Increased economy in marine steam machinery with particular reference to marine boilers. Trans. of the Soc. of naval arch. and marine eng-rs. Стр. 169—200, 1929.

Таблица 125

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Испытание котла Бабкока и Вилькокса на заводе Renfrew								Испытания котла Бабкока и Вилькокса SX на заводе Navy Yard (Филадельфия)			
				№ опытов								№ опытов			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
1	Продолжительность испытания	Z	час.	6	5	6	4	6	4	4	4	3	3	4	4	4	4
2	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	543,4	1100	1100	1100	1100
3	Объем топки	$V_т$	$м^3$	16,65	16,65	16,65	16,65	16,65	16,65	16,65	11,61	11,61	11,61	33,2	33,2	33,2	33,2
4	Количество работающих форсунок	—	—	3	4	6	6	8	8	8	2	3	4	6	8	10	13
	Топливо																
5	Сожжено нефти в час	B	$кг/ч$	1020	1475	1930	2180	2500	2680	3200	575	1080	1565	1350	2680	4090	5400
6	Давление нефти в форсунках	$P_н$	$ати$	7,24	9,84	7,03	8,8	7,73	7,03	9,80	5,48	8,44	9,84	—	—	—	—
7	Температура нефти перед форсунками	$t_н$	°Ц	95	93	93	96	93	95	96	94,5	93	95	65	65	66	63
	Вода и пар																
8	Температура воды, поступающей в котел	$(t_в)'_к$	°Ц	69	64	66	67	73	68	70	63	69	69	100	100	105	103
9	Давление пара в котле	$P_г$	$ати$	9,84	17,64	17,45	17,5	17,57	17,36	17,36	18,0	17,36	17,0	20,3	20,4	20,5	20,3
10	Испарено воды в котле за час	D	$кг/ч$	14680	20850	27800	30700	34300	36600	42800	8150	15200	21820	20900	41000	60700	80500
11	Получено стандартного пара в час (Δi=640 $кал/кг$)	$D_с$	„	13750	19550	25600	28600	31700	33500	39800	7700	1420	20400	—18400	—36500	—54000	—70500
12	Видимая испарительность топлива	$И_в$	$кг/кг$	—	14,41	14,11	14,36	13,74	13,63	13,4	14,16	14,7	13,95	15,5	15,25	14,85	14,9
	Воздух и газы																
13	Температура в котельной	$t_{возд}$	°Ц	26	27	23	20	17	22	24,5	30.5	24,5	26	31,7	25	39	41
14	Температура топки	$(t_г)_т$	°Ц	1475	1475	1545	1550	1540	1570	1575	—	—	—	—	—	—	—
15	Температура газа после пятого ряда труб	$(t_г)''_{5\ р.}$	°Ц	501	635	680	691	717	724	751	273	567	630	—	—	—	—
16	Температура газов у основания дымовой трубы	$(t_г)'_{д.\ тр}$	°Ц	186	214	239	259	294	281	317	209	228	259	230	270	303	337
17	Давление воздуха в котельной	$(\Delta S)_к$	$мм$ вод. ст.	+24,2	+35,6	+44,5	+68,6	+84	+91,5	+150	+15,2	+36,8	+58.5	—	—	—	—
18	Давление воздуха в топке	$(\Delta S)_т$	„ „ „	—1,27	+7,6	+19	+35,6	+50,8	+61	+102	—5,08	+5,2	+12,7	36	89,5	177	185
19	Разрежение у основания дымовых труб	$(\Delta S)'_{д.\ тр}$	„ „ „	—11,4	—12,7	—16,5	—7,6	—15,2	—7,6	—5,08	—7,6	—5,9	—7,6	—3,5	—3,0	—4.3	—6.1
20	Содержание RO_2 в дымовых газах	RO_2	%	13,2	12,9	12,9	12,61	11,8	12,4	12,4	13,3	13,8	13,4	13,4	13,9	14,2	15,0
21	Содержание кислорода в дымовых газах	O_2	%	3,3	3,3	3,65	4,26	5,4	4,2	5,7	2,9	2,0	3,0	3,0	1,9	1,8	1,2
22	Содержание окиси углерода в дымовых газах	CO	%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0
23	Содержание азота в дымовых газах	N_2	%	83,5	83,8	83,45	83,13	82,8	83,4	83,9	83,8	84,2	83,6	83,6	84,2	84,0	83,8
24	Коэфициент избытка воздуха	α	—	1,15	1,17	1,176	1,2	1,28	1,82	1,22	1,14	1,10	1,13	1,15	1,11	1,09	1,03
25	Видимое паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	27	38,4	51	56,5	63	67,3	78,8	15,0	28	40,1	19,0	37,2	55	73
26	Стандартное паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D_с}{H_к}$	„	25,3	36,0	47	52,5	59,3	61,5	73,2	14.15	26,1	37,5	16,9	33,1	49	64
27	Количество нефти, сожженной на 1 $м^2$ поверхности нагрева	$\frac{B}{H_к}$	„	1,87	2,71	3,55	4,1	4,6	4,93	5,9	1,06	1,98	2,88	1.23	2,44	3,67	4.88
28	Количество нефти, сожженной на 1 $м^3$ топки	$\frac{B}{V_т}$	$кг/м^3ч$	61,2	88,5	116	131	150	161	192	34.6	65	94	40,7	81,2	121,5	162.7
29	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	$т \cdot кал/м^3ч$	645	935	1225,0	1385	1585	1700	2030	366	688	995	426	848	1265	1705
30	Количество нефти, сожженной в одной форсунке	$b_ф$	$кг/ф \cdot ч$	340	370	322	363	313	336	400	288	360	391	225	366	403	415
31	Коэфициент теплопередачи поверхности нагрева котла	k	$кал/м^2ч$ °Ц	16,1	21,8	31,9	33,5	37,3	40,0	46,7	9,03	17,10	23,8	—	—	—	—
	Тепловой баланс																
32	К. п. д. котла	η	%	82,2	81,2	82,3	80,5	77,8	77,8	76,3	81,5	80,2	79,6	84.23	82,93	91,57	80,26
33	Потери тепла с уходящими сухими газами	$(q_2)_{с.\ г}$	%	5,9	7,1	8,2	9,25	11,2	10,2	11,5	6,6	7,3	8,6	7.4	8,82	9,39	9,97
34	Потери тепла с уходящими водяными парами, влаги и сгорания H_2	$(q_2)_в$	%	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,6	7,8	7,2	7,3	7,5	6,71	6,97	6,84	7,21
35	Потери тепла от химической неполноты горения	q_3	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	Потери тепла в окружающую среду и другие неучтенные потери	—	%	4.8	4,5	2,1	2,75	3,3	4,4	4,4	4,7	5,2	4,3	1.66	1,28	2,2	2,5

прямых трубок и сложных форм секционных коробок. Вместо них фирма стала применять в котлах изогнутые трубки малого диаметра и цилиндрические секционные коробки.

Благодаря такому изменению конструкции котла удалось увеличить надежность его работы и значительно повысить нагрузку без опасности появления течи в котле. В прежней конструкции котлов Баб-

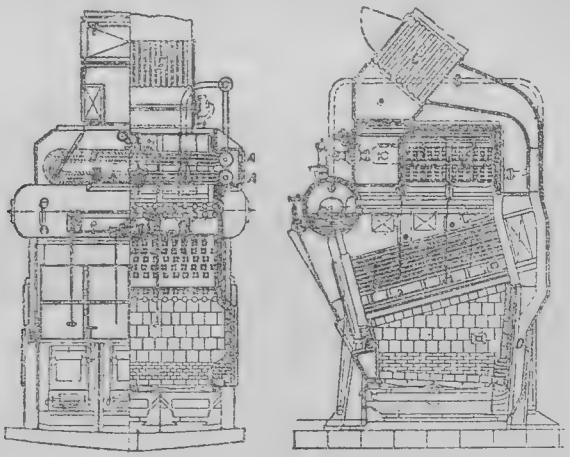


Рис. 332. Котел В и W повышенного давления.

кока и Вилькокса нагрузка часто ограничивалась возможностью появления течи в местах развальцовки труб из-за жесткости последних. Кипятильные трубки были совершенно прямые.

Первый котел нового типа SX, построенный фирмой Бабкока и Вилькокса, был установлен на пароходе «Guardian H. M. S.». Сдаточные испытания котла закончились вполне успешно. Как видно из

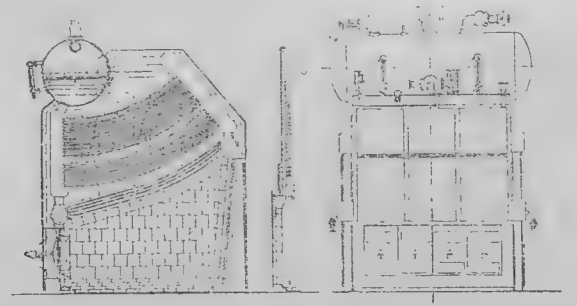


Рис. 333. Опытный котел В и W типа SX.

рис. 333, поверхность нагрева котла, установленного на данном судне, состоит из нескольких секций труб, расположенных вертикально. Внизу коробки секции соединяются короткими патрубками с двумя горизонтально лежащими коробками, в которых также развальцованы трубки. У нижних двух рядов горизонтальных секций диаметр трубок = 59,8 *мм*, а у остальных трубок — 38 *мм*. Диаметр трубок у вертикальных секций судовых котлов равен 25,4 *мм*, а у стационарных установок — 32 *мм*.

Перед установкой данного котла на судно он подвергся тщательным испытаниям на береговой станции. Основные результаты 10

Таблица 126

Элементарный состав мазута

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Анализ топлива, взятого во время оп. 1—10	Анализ проб нефти, взятых во время опытов № опытов 1	2	3	4
1	Углерода на рабочую массу	$C^р$	%	84,72	85,86	85,86	85,53	85,46
2	Водорода на рабочую массу	$H^р$	%	12,79	11,66	11,66	11,35	11,82
3	Серы на рабочую массу	$S^р_л$	%	1,54	1,42	1,42	1,89	1,23
4	Кислорода на рабочую массу топлива	$O^р$	%	0,40	0,84	0,84	1,00	0,31
5	Влага на рабочую массу	$W^р$	%	0,52	—	—	—	—
6	Золы на рабочую массу топлива	$A^р$	%	0,03	—	—	—	—
7	Теплотворная способность топлива	$Q^р_в$	*кал/кг*	10 550	10 500	10 500	10 400	10 630

Таблица 127

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Поверхность нагрева котла	$H_к$	$м^2$	1 045
2	Поверхность нагрева перегревателя	$H_{пе}$	„	102
3	Объем топки	$V_т$	$м^3$	30,2
4	Количество трубок в горизонтальном расп. пучке	n	шт.	157
5	Длина труб в гориз. расп. пучке	l	*мм*	2 959
6	Наружный диаметр „ „ „	$d_н$	„	31,75
7	Количество трубок „ „ „	n	шт.	157
8	Длина „ „ „ „	l	*мм*	3 054
9	Наружный диаметр трубок в гориз. расп. пучке	$d_н$	„	31,75
10	Длина остальных 4 628 кипятильных трубок	l	„	от 8 515 до 3 000
11	Диаметр остальных 4 628 кипятильных труб	$d_н$	„	25
12	Длина 72 U-трубок перегревателя	l	„	8 180
13	„ 50 U- „ „	l	„	8 395
14	Диаметр „ „	d	„	31,75

испытаний котлов типа SX сведены в табл. 125. В той же таблице приведены данные четырех опытов на заводе Navy Yard (Филадельфия) с котлом типа SX поверхностью нагрева 1100 $м^2$ [1].

Во время опытов сжигался мазут, химический анализ которого приведен в табл. 126.

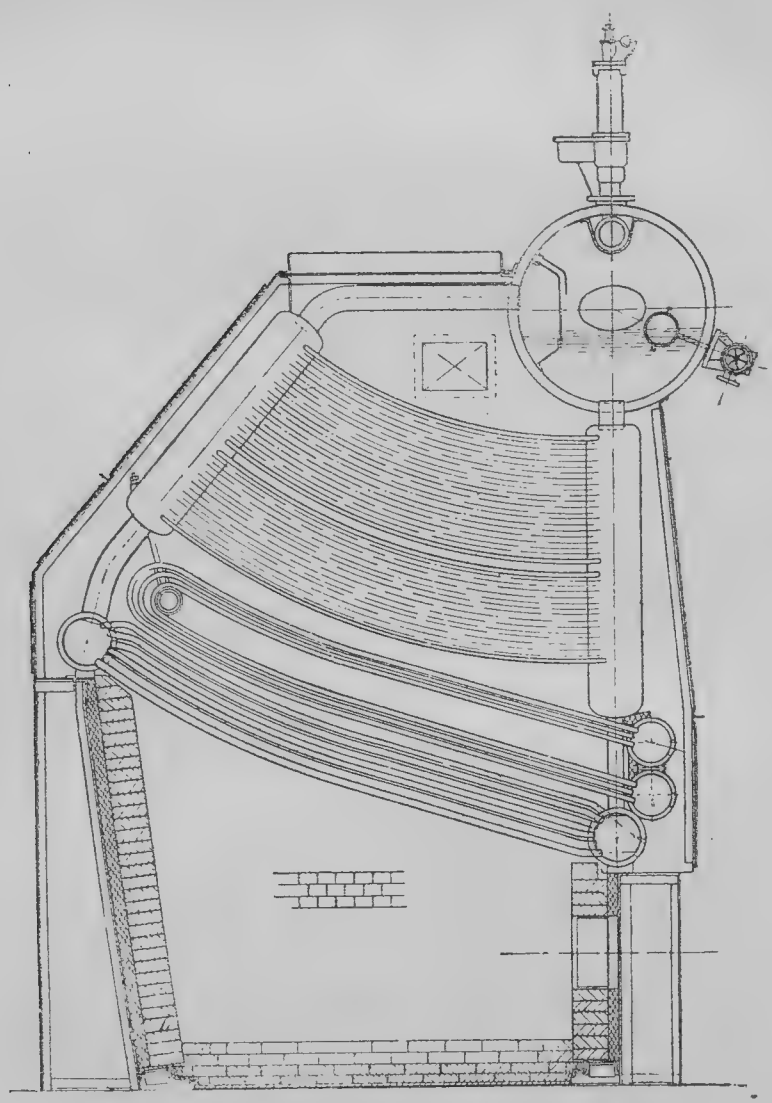


Рис. 334. Котел B и W типа SX.

Как показывают данные табл. 125, котлы SX в сравнении с другими водотрубными котлами дают весьма высокое паронапряжение поверхности нагрева и довольно высокий к. п. д. котла. Котлы типа SX в отношении к. п. д. занимают более выгодное положение, чем другие современные котлы.

[1] King J. H. Increased economy in marine steam machinery with particular reference to marine boilers. Trans. of the Soc. of naval arch. and marine eng-rs. Стр. 169—200, 1929.

Таблица 128

Наименование	Обозначение	Размерность	Дата испытаний		Дата испытаний							
			II-19/XII 1928		июнь 1928 г.							
Продолжительность испытания	Z	час.	4	6	4	4	2	4	2	4	2	4
Скорость хода	W	узлы	33,91	31,67	32,28	26,28	18.70	18,67	16,64	16,69	10,34	10,46
Мощность механизмов	$N_э$	*э. л. с.*	183 655	71 087	135 840	67 530	26 270	25 900	18 200	19 161	4 027	4 281
Часовой расход топлива (нефть)	B	*кг/ч*	79 200	35 800	80 700	39 000	15 000	14 550	10 500	10 570	5 070	4 870
Расход топлива на 1 лош. силу час	$\frac{B}{N}$	*кг/л. с. ч*	0,43	0,504	0,593	0,578	0,573	0,561	0,557	0,551	1,25	1,13
Сожжено нефти на 1 $м^2$ пов. нагрева котла	$\frac{B}{H_к}$	*кг/м² ч*	4,73	3,12	5,15	3,74	2,86	2,78	2,0	2,03	2,09	2,14
Потреблено перегретого пара механизмами	D	*т/ч*	837	364	817	422	152	166	115	124	35,6	47,7
Расход пара на 1 *э. л. с. ч.*	$\frac{B}{N_э}$	*кг/л. с. ч*	4,6	5,06	6,0	6,24	5,81	6,4	6,13	6,46	8,82	11,1
Паронапряжение пов. нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м² ч*	46,5	31,7	52	40,3	29,1	31,7	22,1	23,6	7,9	11,5
Тепловое напряжение топки ($Q_{нефт} \cong$ $\cong 10800$ *кал/кг*)	$\frac{Q}{V_т}$	*т · кал/м³ ч*	1 710	1 130	1 865	1 350	1 405	1 006	730	730	440	423
Видимая испаряемость нефти	$И_в$	*кг/кг*	10,57	10,14	10,688	10,802	10,16	11,385	11,02	11,738	7,02	9,821
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	21,2	20,0	21,2	20,7	20,0	20,2	19,5	19,5	19,3	19,3
Перегрев пара в перегревателе	$\Delta t_{пе}$	°Ц	41,5	41,3	48	41,5	36	29	27	29	17,5	17
Число работающих котлов	—	—	16	11	15	10	5	5	5	5	4	4

Полученные во время опытов высокие к. п. д. и $\frac{D}{H}$ послужили основной причиной их широкого распространения на судах. Так, например, к 1931 т. в американском флоте было построено 32 котла SX.

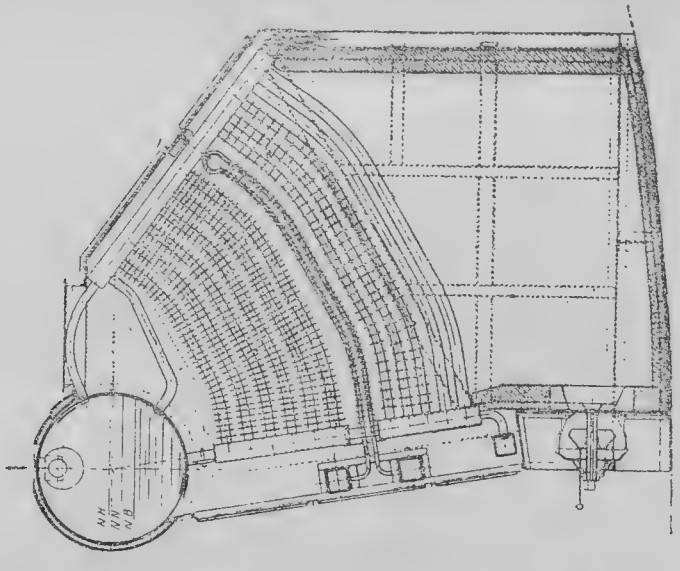


Рис. 335а. Ребристый котел парохода „Conte d'Azur".

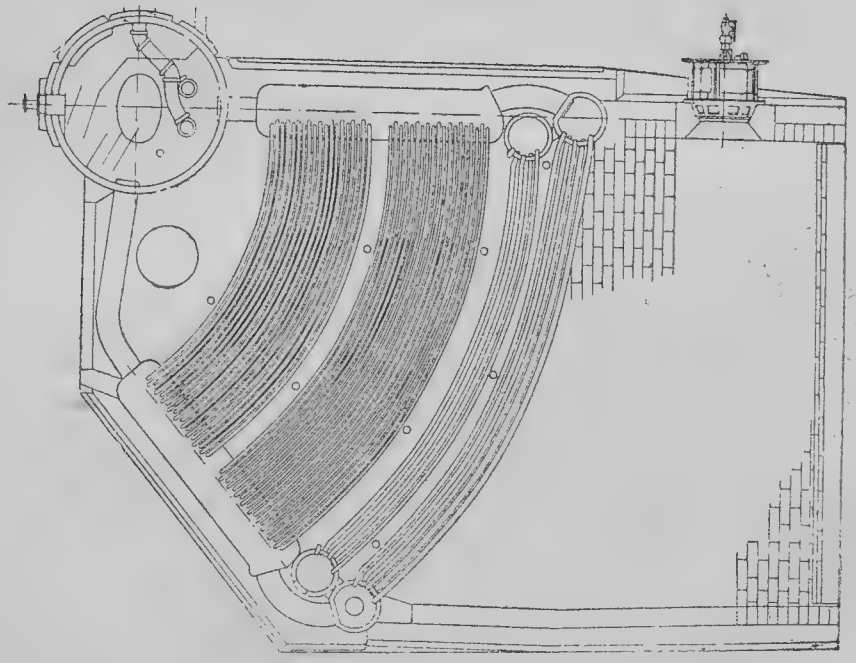


Рис. 335. Котел B и W типа SX.

Основные характеристики котла Бабкока и Вилькокса типа SX-экспресс, установленных на авианосце «Saratoga» [1], даны в табл. 127 и 128.

[1] Rock G. H. Some observations on the design of airplane carriers and notes on the „Saratoga" and „Lexington". T. S. N. arch. and mar. engrs. P. 63—76, 1928.

По данным испытаний паронапряжение поверхности нагрева котла доходило до 52 *кг/м²ч*. Дальнейшее его повышение ограничивалось чрезмерно высокими тепловыми напряжениями топочного пространства. В одном из опытов оно поднималось до 1865 *т·кал/м³ч*. Такое тепловое напряжение топочного пространства может считаться рекордным для судовых водотрубных котлов нормальных конструкций.

На рис. 334 и 335 показаны котлы Бабкока и Вилькокса типа SX с пароперегревателем. Котел, изображенный на рис. 335, отличается от котла на рис. 334 лишь тем, что трубки пароперегревателя в нем как с фронта, так и сзади котла крепятся в коллекторы.

Такое устройство перегревателя позволяет заполнять его водой и выпускать из него воздух во время заполнения его водой, что весьма выгодно отличает данный котел от котла, изображенного на рис. 334.

216. Ребристые котлы

Наряду с разработкой в Америке котлов Бабкока и Вилькокса типа SX, во Франции инженеры Робер и Люке (E. Rauber и M. Luquet) работали над созданием ребристого котла [1]. По их проекту впервые ребристый котел был построен в 1925—1926 гг. французской фирмой Delaunay Belleville (рис. 335 а).

По внешнему виду котел похож на котлы Бабкока и Вилькокса типа SX и отличается от последних лишь прямоугольным сечением коллекторов и ребристой формой поверхности нагрева.

Переход к устройству поверхностей нагрева ребристой формы был продиктован желанием получить высокие паронапряжения поверхности нагрева и небольшие габаритные размеры котла. Эту задачу конструкторам котла в значительной мере удалось разрешить. Максимальная паропроизводительность котла составляла 8 *т*, паронапряжение поверхности нагрева доходило до 83 *кг/м²ч*, длина же нижних рядов труб была равной 3,3 *м*, а ширина трубного пучка 3,42 *м*.

Применение ребристых поверхностей нагрева, принося с собой ряд положительных качеств котла, одновременно вызвало появление в котле и ряда недостатков. Основные из них: 1) большая вероятность заноса поверхностей нагрева сажей и золой; 2) тяжелые термические условия работы ребристых труб. Температура ребер значительно выше температуры цилиндрической стенки труб.

Для уменьшения этих недостатков первые два ряда труб, воспринимающие лучистое тепло, были поставлены гладкими. У последующих рядов труб количество ребер на единицу длины ставилось больше к концу газохода.

217. Котлы системы Вагнера

Больших успехов в повышении тепловых нагрузок поверхностей нагрева, к. п. д. котла и в уменьшении веса и габаритных размеров котельной установки добилась немецкая котлостроительная фирма Вагнер [2].

---

[1] Англ. пат., № 263101, 1925 г. Нем. пат., № 503595, 1926 г. Muller F. Stoomketels met ribbenbuizen Systeem RL. Ingenieur. V. 47, № 18, Apr. 1929 г. P. 59, 1932.

[2] WRH. Стр. 268—279, 1930. Wagner R. Die leichte Hochdruck-Dampfturbinenanlage in der Schiffahrt.

Англ. пат., 140081, 1919 г. Нем. пат., № 356415, 1919 г.; № 381001, 1921 г.; № 388858, 1921 г.; № 388859, 1921 г.; № 621917, 1933 г.; № 618166, 1934 г.; № 608906, 1935 г.; № 551232, 1929 г. (одноколлекторный котел).

Для понижения веса котла фирма Вагнер до предела уменьшила диаметр кипятильных трубок и увеличила скорость протекания газов по трубному пучку. Чем меньше диаметр трубок и чем больше скорости газов, тем выше будут коэфициенты теплопередачи у трубок. Это положение наглядно показано на рис. 336. Здесь нанесены вычисленные по Нуссельту коэфициенты теплопередачи в зависимости от диаметра трубок и скорости газов. У котлов Вагнера наружный диаметр первых рядов трубок принят равным 30 *мм*, а скорость газов взята равной 7 *м/сек*. Если удвоить скорость газов и уменьшить наполовину наружный диаметр трубок, то коэфициент теплопередачи увеличится приблизительно в два раза. Увеличение коэфициента

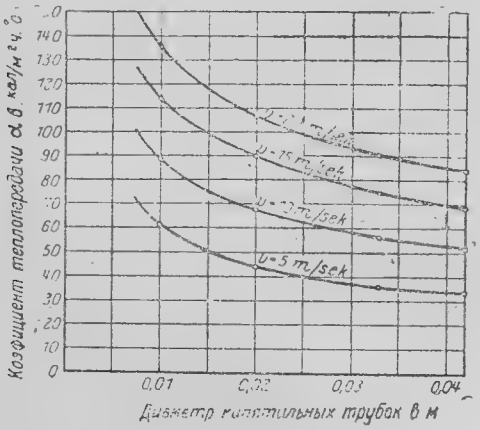


Рис. 336. Зависимость коэфициентов теплопередачи α от диаметра кипятильных трубок.

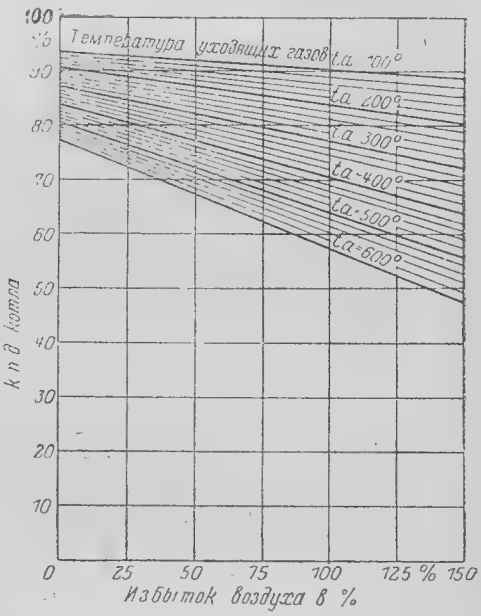


Рис. 337. Зависимость к. п. д. котла от температуры уходящих газов и коэфициента избытка воздуха α.

теплопередачи в два раза означает уменьшение также в два раза поверхности нагрева и ее веса. Одновременно уменьшился бы вес воды в кипятильных трубках примерно в 4 раза. Последнее позволило бы увеличить скорость разводки пара.

Однако, уменьшение диаметра трубок можно производить только до определенного предела, так как оно влечет за собой ухудшение циркуляции воды в котле из-за возрастания гидравлических сопротивлений движению пароводяной смеси по трубкам малого диаметра.

Одновременно с работой над уменьшением веса судовой силовой установки фирма Вагнер провела большую исследовательскую работу по увеличению к. п. д. котла за счет уменьшения потерь с уходящими газами. Насколько велики могут быть потери с уходящими газами при больших коэфициентах избытка воздуха и высоких температурах уходящих газов, видно из рис. 337. Здесь нанесены потери с уходящими газами в зависимости от температуры их и коэфициентов избытка воздуха.

Еще только 10 лет тому назад считалось нормальным, если потери с уходящими газами в судовых установках доходили до 30%. В последнее время такое положение стало нетерпимым. В качестве первой меры многие фирмы и научно-исследовательские институты

предложили применять воздухоподогреватели различных типов. Введение в эксплоатацию подогревателей воздуха не замедлило показать себя и с отрицательной стороны. Воздухоподогреватели значительно увеличили вес котельной установки, хотя и позволили увеличить к. п. д. котла.

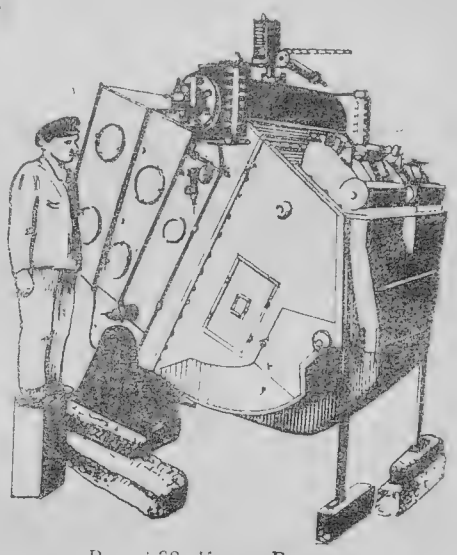


Рис. 338. Котел Вагнера.

Увеличение к. п. д. до 85% в наши дни не могло считаться удовлетворительным. Необходимо было в легком судовом котле повысить к. п. д. до 90%, чего добились уже в лучших стационарных установках. Для осуществления этой задачи прежде всего необходимо было уменьшить коэфициент избытка воздуха и температуру уходящих газов. Отчасти это было достигнуто путем постановки воздухоподогревателей. Для обеспечения надежности работы воздухоподогревателей стремились получить достаточно прочную и жесткую конструкцию их, как, например, у пластинчатых подогревателей. Увеличение веса подогревателей в основном происходило за счет увеличения толщины их стенок, что

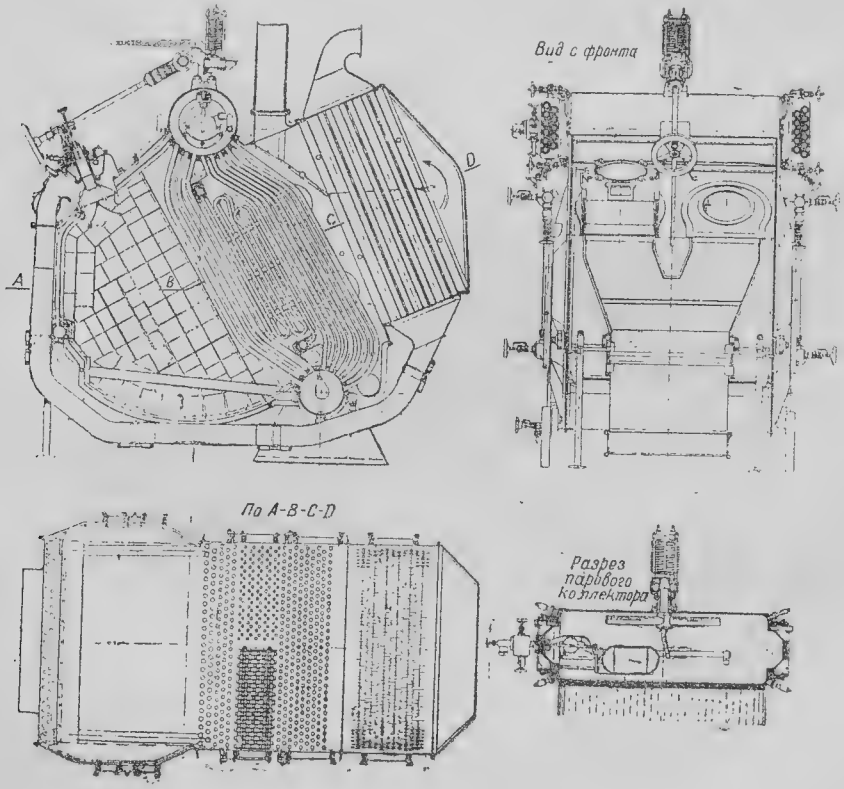


Рис. 339. Котел Вагнера.

вызывалось необходимостью удлинить срок службы подогревателей в связи с возможностью разъедания их стенок газами. Применение тяжелых воздухоподогревателей в наши дни терпимо лишь для грузовых судов.

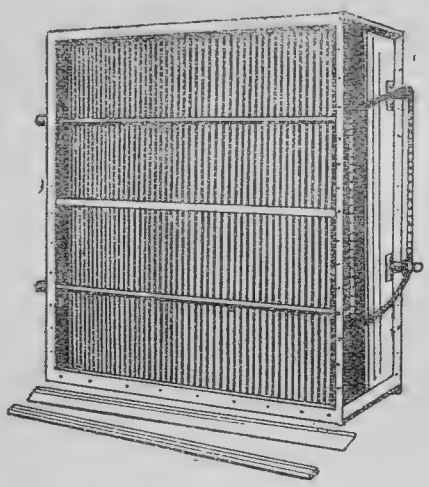


Рис. 340. Воздухоподогреватель котла Вагнера.

Для выхода из этого положения фирма Вагнера применила для воздухоподогревателей весьма тонкую (0,2 *мм*) нержавеющую сталь, благодаря чему ей удалось построить легкий подогреватель воздуха сравнительно больших размеров.

Из других факторов, способствующих увеличению к. п. д., следует, помимо подогревателей воздуха, указать на применение высокого перегрева пара ($t_{пе}$ = 425° Ц). Применение последнего в сравнении с насыщенным паром позволяет увеличить к. п. д. котла при заданном давлении пара на 6%. Фирма Вагнер пошла на возможно более высокий перегрев пара, несмотря на то, что это удорожало стоимость установки за счет увеличения веса пароперегревателя.

Если бы материал трубок и лопаток турбин мог выдержать температуру пара в 600° Ц, то при поддержании в холодильнике разрежения порядка 0,93 *ати* можно было бы понизить расход мазута

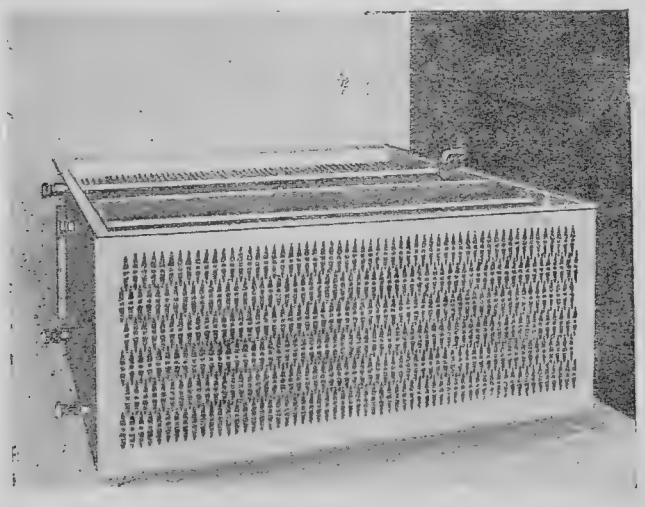


Рис. 340 а. Воздухоподогреватель котла Вагнера.

до 0,26 *кг/л. с. ч.* Сюда включен и расход на собственные нужды, как-то: насосы, вентиляторы и т. д. Расход топлива на 1 *л. с.* был бы весьма близок к расходу нефти у двигателей внутреннего сгорания. Вот почему в настоящее время так много тратится труда на освоение применения сверхвысокого перегрева пара.

Этим мы исчерпали важнейшие требования к современной судовой котельной установке с экономической и технической точек зрения.

Перейдем непосредственно к рассмотрению котлов фирмы Вагнера. На рис. 338—339 показаны общий вид и конструкция котла Вагнера. Два таких котла были установлены на быстроходном таможенном катере. Котел состоял из двух цельнотянутых коллекторов и одного пучка кипятильных трубок. Каждый котел должен был давать в течение часа 4 *т* пара при давлении в 45 *ати*. Поверхность нагрева котла равнялась 550 *м*². Котел был снабжен воздухоподогревателем, поверхностью нагрева в 80 *м*² (рис. 340 и 340 а). Воздухоподогреватель выполнен из листов монель-металла толщиной 0,2 *мм*. Свежий воздух поступает в линзообразные каналы подогревателя и протекает по ним в поперечном направлении. Дымовые газы омывают воздушные каналы в продольном направлении.

Как видно из рис. 340, подогреватель получился весьма компактным. Опытные наблюдения показали, что газовые сопротивления в данном воздухоподогревателе были сравнительно малыми. Выгодной особенностью воздухоподогревателя является легкая возможность очистки поверхности нагрева от золы.

В подогревателе воздух повышает свою температуру приблизительно до 200° Ц, затем по особому каналу он поступает в топку. Последняя снабжена двумя механическими нефтяными форсунками с несколькими отверстиями. Как показали опытные наблюдения, пламя получалось коротким, а избытки воздуха небольшими.

Перед постройкой своей силовой установки фирма Вагнер провела большую исследовательскую работу о выборе наивыгоднейшего рабочего давления в котле при наименьшем весе установки и наибольшем к. п. д. ее. Исследования фирмы показали, что давление пара в 60 *ати* находится в полном соответствии с получением наименьших расходов топлива при наименьшей толщине кипятильных трубок. Если принять внутренний диаметр кипятильных трубок равным 2 *см*, то для данного давления необходимая толщина трубок из нержавеющей стали получается равной 1 *мм*.

Применение кипятильных трубок из обыкновенной стали повлекло бы за собой необходимость увеличения вышеупомянутой толщины трубок на 1 *мм* на ржавление и на неточности при протяжке. Это являлось одной из основных причин большого веса других силовых установок. Для большей надежности работы кипятильных трубок при указанных выше размерах компания Вагнер в первых своих котлах приняла рабочее давление пара равным только 45 *ати*.

В котле обращает на себя внимание специальное устройство горловин в днищах парового и водяного коллекторов. Опорные части для крышек горловин поставлены на крупной нарезке. Крышки горловин прижимаются к опорным частям отчасти распорными болтами, а отчасти внутренним давлением пара. Для достижения большей плотности соединений крышки горловин ставятся на металлической прокладке.

По эксплоатационным наблюдениям этот способ вполне себя оправдал. Для большей наглядности на рис. 339 показан рассматриваемый котел без кожуха. Днища и боковые стенки топки сделаны из тонких стальных листов. Все стенки топки для большей жесткости изогнуты. Топочные стенки обмурованы с внутренней стороны шамотным кирпичом вафлеобразной формы (рис. 341). Благодаря этому с одной стороны получается воздушная изоляция, а с другой

стороны — экономия в весе топочной кладки. Пароперегреватель в котле расположен в пучке труб.

При конструировании водомерных стекол фирма Вагнер руководствовалась требованием получения высокой степени надежности работы при возможно наименьшем весе. Водомерные стекла выполнялись из двух рядов круглых стеклянных пробок (рис. 342, 343). Последние с целью непрерывного наблюдения могли заменяться. Для ясности наблюдения за положением уровня воды в котле пробки устанавливались в водомерном стекле с передней и задней его сторон, а сзади располагалась софитовая лампа. Плотность соединения в водомерном стекле поддерживалась также внутренним давлением пара, прижимающим стеклянные пробки к рамке стекла. Уровень воды в котле регулировался автоматом питания.

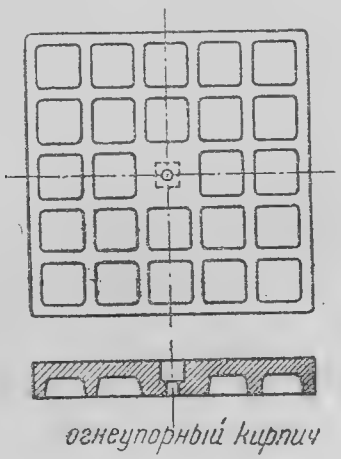


Рис. 341. Огнеупорный кирпич.

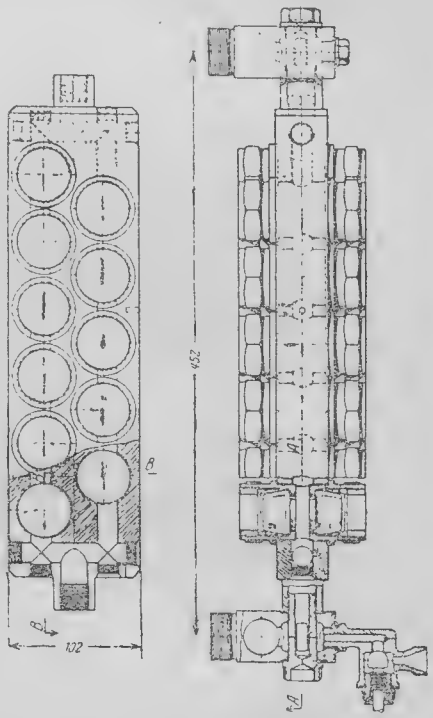


Рис. 342. и 343. Водомерное стекло.

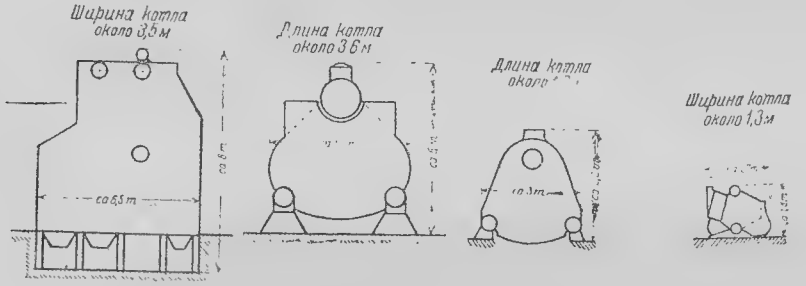
Небезынтересно заметить, что в будущем фирма предполагает отказаться от применения нижнего водяного коллектора. Нижние концы кипятильных трубок будут в таком случае соединяться между собой специальными скреплениями. Это, по мнению фирмы, должно уменьшить вес как котла, так и воды в нем, а также сократить время разводки котла и дать более активное нагревание нижних поверхностей нагрева.

Весьма интересным в котле Вагнера является вращающийся прибор, установленный в паровом коллекторе для поддержания искусственной циркуляции воды в нем. Применение искусственной циркуляции должно не допустить перегрева трубок при высоких паронапряжениях поверхностей нагрева. Одновременно этим приспособлением преследовалась цель постоянного хорошего промывания и очистки всей системы трубок.

На рис. 344 дано примерное сравнение котла Вагнера с другими существующими системами судовых водотрубных котлов по весу и

габаритным размерам. Преимущества котла Вагнера по сравнению с другими водотрубными котлами весьма велики, особенно по габаритным размерам.

Больших успехов в области уменьшения веса и габаритных размеров фирма Вагнера достигла и за счет уменьшения вспомогательных механизмов. Так, вместо тяжелых и громоздких поршневых насосов для питания водой котла и для подачи нефти к форсункам, фирма применила трубонасос с 15 000 об/мин. При испытаниях насос дал производительность в 12 *т/ч* против необходимой 8 *т/ч*. Весь турбо-



Нормальный стационарный вертикально - водотрубный котел без воздухоподогревателя.	Нормальный водотрубный котел для коммерческого парохода без воздухоподогревателя.	Нормальный водотрубный котел для миноносца без воздухоподогревателя.	Нормальный водотрубный котел высокого давления системы Вагнера с воздухоподогревателем.
Вес котла около 50 *т* (без обмуровки).	Около 44 *т*	Около 10 *т*	Около 3,6 *т*
Занимаемый объем 180 *м*³ с обмуровкой.	Около 120 *м*³	Около 15 *м*³	Около 6,5 *м*³

Рис. 344. Вес и объем, занимаемые различными котлами, отнесенные к мощности котла в 1000 *л. с.*

насос весил всего 230 *кг*. Расход топлива в рассматриваемом котле был гарантирован фирмой в 0,33 *кг/л. с.*

Основные характеристики котлов Вагнера, установленных на германских пароходах, сведены в табл. 129.

Данные таблицы указывают на весьма большие достижения, полученные фирмой Вагнера, особенно в области повышения к. п. д. котла и паронапряжения поверхности нагрева.

Фирма Вагнер выполнила проект установки мощностью в 1200 *л. с.* для увеселительной яхты (рис. 345). Вес всей установки без валопроводов был доведен до 6 *кг/л. с.*, включая и котельную воду.

Снижение веса в новой установке с 9 до 6 *кг/л. с.* удалось достигнуть благодаря следующим основным мероприятиям:

1) применению кипятильных трубок из тонкой нержавеющей стали,
2) устранению нижнего водяного коллектора,
3) экономии в весе зубчатых передач и т. д.

Небезынтересно остановиться также на весьма удачном сочетании требований судо- и машиностроения, которое было выполнено в проекте машинной установки, показанной на рис. 346. Эта установка рассчитывалась для грузового парохода водоизмещением 8000 *т*, мощность ее равна 4000 *л. с.* Котельную этого парохода по проекту

Таблица 129

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Название пароходов			
				„Brummer" und „Brumse"	„Tannenberg"	„Scharnhorst"	„Gneisenau"
1	Год постройки	—	—	1930	1934	1934	1934
2	Мощность механизмов	$N_э$	тыс. *л. с.*	1,6	12,5	26—32,6	26—32,6
3	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	50	60	50	50
4	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	425	450	470	470
5	Число котлов	—	—	2	2	4	4
6	Паропроизводительность одного котла	D	*т/ч*	4	25	36	36,5
7	Поверхность нагрева одного котла	$H_к$	*м²*	50	300	650	607
8	Суммарная пов. нагрева одного котла	ΣH	„	143	959	1898	1807
9	Диаметр кипятильных трубок	d	*мм*	18—24	30—40	30—40	30—40
10	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	млн. *кал/м³ч*	2,15	0,9	0,81	1,04
11	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	80	83	55	60
12	Паронапряжение всей поверхности нагрева	$\frac{D}{\Sigma H}$	„	28	26	19	20
13	Вес котла с водой, готового к эксплоатации, включая обмуровку и кожух, на 1 *т* производимого пара	$\frac{G_к}{D}$	*т/т*	0,7	1,6	2,5	2,5
14	То же, включая воздухоподогреватель	$\frac{G_{к.у}}{D}$	„	0,8	—	2,8	2,8
15	Поверхность нагрева перегревателя	$H_{пе}$	*м²*	—	120	280	260
16	Поверхность нагрева лучевосприятия	$H_к^л$	„	—	24,5	47	41

Продолжение табл. 129

Наименование	Обозначение	Размерность	„Brummer" und „Brumse"	„Tannenberg"	„Scharnhorst"	Gneisenau	
						1	2
Объем водяного пространства котла	$V_к^в$	*м³*	—	4,6	8,47	7,83	—
Объем парового пространства в коллекторе	$V_к^п$	„	—	1,1	2,54	2,54	—
Объем топки	$V_т$	„	—	19	36	28	—
Вес котла	$G_к$	*т*	—	37,5	93	100	—
Вес котла с водой	$G_{к+в}$	„	—	42	98	104	—

Продолжение табл. 129

Наименование	Обозначение	Размерность	„Brummer" und „Brumse"	„Tannenberg"	Scharnhorst"	Gneisenau	
						1	2
Опытные данные							
Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	—	—	48,7	49	50
Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	—	—	452	450	466
Температура воды, поступающей в котел	$t'_к$	°Ц	—	—	195	147	167
Сообщено тепла в котле и перегревателе 1 *кг* воды	$\Delta i_п$	*кал/кг*	—	—	598	646	634
Сожжено топлива в час	B	*т/ч*	—	—	2,08	2,92	4,6
Число работающих вращающихся форсунок системы	n	шт.	—	—	2	—	—
Теплотворная способность нефти	$Q^р_н$	*кал/кг*	—	—	9400 [1]	8950 [1]	—
Паропроизводительность котла	D	*т/ч*	—	—	29,5	36	55,8
Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²ч*	—	—	45,5	59,3	91
Паронапряжение поверхности нагрева котла и перегревателя	$\frac{D}{H_{к+пе}}$	»	—	—	31,7	41,5	64,5
Испарительность топлива	$И$	*кг/кг*	—	—	14,2	12,3	12,1
Коэфициент избытка воздуха	α	—	—	—	1,28	1,3	1,31
Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°Ц	—	—	210	240	320
К. п. д. котельной установки	η	%	—	—	90,3	88,8	86,2

предполагалось разместить в машинном отделении над турбинами. Установка была принята в 6 котлов, которые расположены в два параллельно стоящих ряда. Один из котлов является резервом. Между котлами оставлено достаточное пространство для вентиляции машинного отделения и для возможности разбора машин.

Выгодной особенностью такого расположения котельной является небольшая потеря тепла и давления в паропроводах, так как последние получались короткими. Полученная экономия в весе силовой установки в данном случае может быть эффективно использована из-за освобождения отсеков, занимаемых котлами.

Для обеспечения живучести судна вся машинная и котельная установка разделена водонепроницаемой перегородкой.

В заключение отметим, что фирма Вагнера в настоящее время ведет исследовательскую работу по разработке котлотурбинной установки для быстроходных дирижаблей. Для этой цели фирма стремится уменьшить вес установки с 6 *кг/л. с.* до 3 *кг/л. с.* Уменьшение веса машинной установки предполагается провести за счет дальней-

[1] Мексиканская нефть.

Таблица 129b[1]

Основные характеристики отдельных классов кораблей постройки 1921—1933 гг.

№ по пор.	Наименование корабля	Класс корабля	Год постройки	Водоизмещение в *т*	Скорость в узлах	Мощность механизмов в *л. с.*	Система турбины	Система котлов	Колич. котлов	Отопление котлов	Запас топлива в *т*	Дальность плавания	Примечания
	I. Англия												
1	„Nelson" . . .	Линкор	1925	39 000	23,5	46 000	Бр. Керт зуб. п.	Ярроу	8	Нефтяное	4 000	5750/(23) / 14 000/(15)	$P_к =$ $= 17{,}6$ *ати*
2	„Hermes" . . .	Авианосец	комплектный, 1923	11 125	25	40 000	Парсонс зубч. п.	То же	. .	То же	1 000 / 2 000	—	—
3	„Dorsetshire" .	Крейсер	1929	10 160	32,25	80 000	Турб. зуб. пер.	То же	—	То же	3 200	10 000 (10—14)	
4	„Codrington" .	Лидер	1929	1 550 / (2086)	35—38	39 000	Парсонс зуб. пер.	То же	—	То же	425 / 500	—	$P_к =$ $= 21$ *ати*
5	„Acheron" . .	Эсминец	1930	1 350 / 1 500	35	34 000	Турб. редукт.	То же	3	То же	380	—	$P_к = 35$ *ат.* Котлы с перегревателем и воздухоподогревателем $\frac{B}{N_э} = 0{,}276$ *кг/э. л. с. ч.*
	II. США												
1	„Colorado" . .	Линкор	1921	33 120	20,67	37 400	Вестингауза турб. с эл. прив.	[1] Бабкок и Вилькокс	8	То же	2 500 / 4 000	12 000 (15)	—
2	„Lexington" . .	Авианосец	1925	33 530 / 35 800	33,9 (3)	183 655 (3)	Турб. эл. прив.	2) Ярроу 3) B и W тип SX	16 16	То же	7 000	—	На ав. „Saratoga" котлы B и W типа SX White Forster $P_к =$ $= 21{,}2$ *ати*
3	„Saratoga" . .	То же											
4	„Portland" . .	Крейсер	1932	9 950	32,5	107 000	Парсонс зуб. пер.	Уайт Форстер (типа SX)	8	То же	—	—	$P_к =$ $= 21{,}1$ *ати*
5	„Porter" . . .	Лидер	1933	1 850	37	50 000	Турб. с зуб. прив.	Котлы водотрубн. высокого давл.	—	То же	500	—	—
	III. Япония												
1	„Mutsu" . . .	Линкор	1921	32 720 / 34 500	23,4	48 000	Турб. зуб. пер.	Кампон	12	Смешанное	4 000 у. + 1 000 н.	—	—
2	„Akagi" . . .	Авианосец	1925	28 600	28,5	131 200	Турб. зуб. пер.	Кампон	19	Смешанное	2 100 у. + 3 900 н.	—	—
3	„Atago" . . .	Кр. I кл.	1930	10 160	33	130 000	То же	То же	—	Нефтяное	2 000	1 400 (14—15)	—
4	„Abukuma" . .	Кр. II кл.	1923	5 278 / 5 670	33	90 000	То же	То же	12	Смешанное	350 / 1 500	9 000 / (10)	8 котлов на нефти, 4 котла на угл. раб.
5	„Fubuki" . . .	Эсм. I кл.	1927	1 725 / 1 850	35	50 000	Парсонс зуб. пер.	То же	—	Нефтяное	400	4 000 (15)	—
6	„Wakatake" . .	Эсм. II кл.	1922	914	31,5	38 500	То же	То же	3	Смешанное	100 у. + 180 н.	3 000 (1 5)	—

Продолжение табл. 129б

№ по пор.	Наименование корабля	Класс корабля	Год постройки	Водоизмещение в *т*	Скорость в узлах	Мощность механизмов в *л. с.*	Система турбины	Система котлов	Колич. котлов	Отопление котлов	Запас топлива в *т*	Дальность плавания	Примечания
	IV. Франция												
1	„Dunkerque“ .	Линкор	1932	26 500	29,5	100 000	Рато	Indret	6	Нефтяное	—	7 500 (15)	—
2	„Commandant Teste“ . . .	Авиатрансп.	1929	10 160	21,37	21 000	Шнейдер Целли зуб. пер.	Ярроу	4	Смешанное	290 г. + 720 у.	6 000 (10)	—
3	„Duquesne“ . .	Крейсер	1925	10 160	35,3	135 000	Рато	Гюйо	9	Нефтяное	1 800	5 000 (15) / 700 (34,5)	8 котлов основных, 1 резервный
4	„Tigre“	Лидер	1924	2 160	36,7	58 000	Бреге	Дю-Тампля	5	То же	250 / 540	3 500 (15) 2 500 (18) 900 (36)	Кипятильные трубки мелкокалиберные
5	„Typhon“ . . .	Эсминец	1924	1 340 / 1 727	33	33 000	Целли	—	3	То же	—	—	Котлы водотрубные, система не указана, с мелкокалиберными кипятильными трубками
	V. Италия												
1	„Trento“ . . .	Крейсер	1927	10 160 / 10 980	35,5	150 000	Парсонс зуб. пер.	Ярроу	12	Нефтяное	3 000	3 200 (25) 1 540 (35)	$P_к$ = = 21,1 *ати*
2	„Leone“ . . .	Лидер	1923	2 283	35	50 000	То же	То же	4	То же	200 / 400	1 200 (20)	—
3	„Folgore“ . . .	Эсминец	1931	1 350 / 1 465	38	44 000	То же	То же	3	То же	225	—	—
	VI. Германия												
1	„Deutschland“	Линкор	1931	10 160	26	56 800	Дизель	—	—	—	—	10 000 (20)	—
2	„Leipzig“ . . .	Крейсер	1929	6 000	32	60 000 турб. 12 000 диз.	Турб. зуб. пер.	Морские типа Шульц—Торникрофт	6	Нефтяное	—	3 800 (14,5) с диз. 7 000 (14,5) с турб.	Котлы двойные
3	„Wolf“	Эсминец	1927	800 / 1 000	34	23 000	То же	Шульц—Торникрофт	3	То же	330	—	—

Таблица 130[1]

Вооруженные силы главных морских держав на 1 ноября 1931 г.[2]

	Типы кораблей													
	Л. к.	Л. кр.	Л. кор. до дредноут. типа	Авиан., авиатр.	Легк. кр.	Лидера	Эсминцы	Миноносцы	Мониторы	Сторожев. и канон. лодки	Ст-ки прот. лод.	Мин. с загр.	Тральщики	Речные канон. лод.
Англия	12	3	—	7	37(4)	16	146(12)	—	3	35(4)	5	8(1)	79	19
США	15	—	—	3(1)	10	—	215(5)	—	—	11	80	14	43	8
Япония	6	3	—	4	21	—	111(4)	—	—	4	—	16(2)	10(2)	10
Франция	6	—	3	2	7(2)	19(2)	59	6	—	57(3)	52	3(1)	26	20
Италия	4	—	—	1	11(4)	20	72(4)	35	4	10	9	15	48	1
Германия	2	—	4	—	6	—	26	—	—	8	18	17(7)	26	—

[1] В 3-м столбце в числителе дано нормальное водоизмещение (см. стр. 222—225).
В 3-м столбце в знаменателе дано максимальное водоизмещение.
В 10-м столбце дано: у. — уголь, н. — нефть.
В 11-м столбце дальность плавания указана при наибольшем запасе топлива. Цифра в скобках показывает, к какой скорости хода относится соответствующая дальность плавания.

[2] В скобках указаны строящиеся корабли.

шего уменьшения веса котла путем уменьшения коэфициента безопасности. Если на воздушных судах допускают двукратный запас прочности по отношению к пределу текучести материала, то при по-

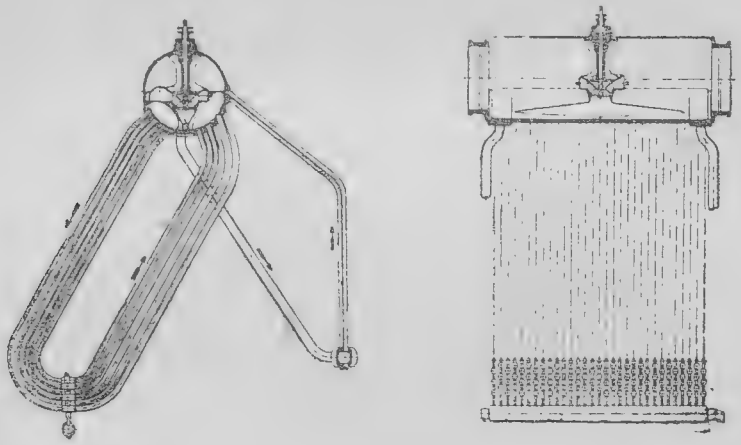


Рис. 345. Одноколлекторный котел Вагнера

стройке котельно-турбинной установки можно безболезненно ограничиться трехкратным коэфициентом безопасности прочности вместо пятикратного, обычно принимаемого в настоящее время.

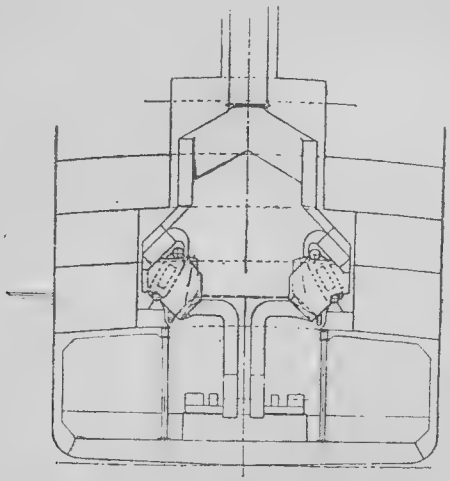


Рис. 346. Проект установки котла Вагнера в машинном отделении.

В заключение этой главы приведем табл. 129а применения различных типов и систем судовых котлов в военных флотах различных стран к 1935 г.[1] По данным этой таблицы, отдельные системы котлов, как-то: Бельвиля, Никлосса и Блекиндена, за последние 15 лет уже не строились. Наоборот, в 1920—1935 гг. получают большое распространение ведущие системы котлов, как-то: 1) Ярроу, 2) Бабкок и Вилькокс, 3) Уайт Форстер, 4) Бабкок и Вилькокс типа SX, 5) Кампон, 6) Конзей, 7) Дю-Тампля, 8) Торникрофта 9) Гюйо, 10) Шульц—Торникрофта. Перечисленные 10 систем котлов к 1935 г. обеспечивали около 93% мощности на военных кораблях мира. Мощность же остальных 12 систем котлов составляла на военных кораблях всего около 7%.

Для представления о количественных и качественных характеристиках военных флотов мира приведены табл. 129 b и 130. Табл. 129 b дает нам основные характеристики отдельных классов кораблей больших флотов, а табл. 130 показывает, сколько кораблей отдельных классов имели крупные военные флоты к 1931 г.

---

[1] Janés fighting ships. London. 1935 г.

Анализ таблиц показывает, что по количеству и качеству военных кораблей в настоящее время первое место занимает Англия, за ней идут США, Япония, Франция, Италия и Германия.

Силовые установки современных военных кораблей достигли весьма больших размеров. Например, мощность механизмов авианосца «Saratoga» (США) составляет 183 тыс. *л. с.*, на французском крейсере «Duquesne» 135 тыс. *л. с.* и на японском крейсере «Atago» 130 тыс. *л. с.*

ВЫВОДЫ

1. В связи с кризисом и подготовкой к новой империалистической войне значительно выросли требования, предъявляемые к постройке и эксплоатации судовых паровых котлов.

2. Для увеличения быстроходности коммерческих и военных судов заводы и научно-исследовательские институты продолжают работу по:

а) уменьшению веса и габаритных размеров котлов;

б) повышению к. п. д. котлов;

в) повышению паронапряжений поверхностей нагрева;

г) повышению паропроизводительности котла;

д) увеличению давления пара и температуры перегретого пара.

3. Вес котлов Джонсона доведен до 714 *кг* на 1 *т* производимого пара. В котлах Ярроу[1] вес удалось уменьшить до 697 *кг* на 1 *т* пара.

4. Уменьшение веса котлов достигалось путем:

а) применения для изготовления поверхностей нагрева нержавеющей стали,

б) уменьшения диаметра кипятильных трубок до 20 *мм*,

в) увеличения скорости газов до 15 *м/сек*,

г) уменьшения коэфициента запаса прочности до 3 против обычно применяемого 5.

5. В последние годы к. п. д. водотрубных котлов удалось повысить до 85—90% против примерно 50% в конце XIX в.

6. Увеличение к. п. д. котла достигалось:

а) за счет уменьшения тепловых потерь с уходящими газами путем снабжения котлов пароперегревателями и воздухоперегревателями;

б) за счет уменьшения тепловых потерь от механической и химической неполноты горения путем замены ручных топок механическими, нефтяными и пылеугольными;

в) за счет уменьшения тепловых потерь в окружающую среду путем покрытия кожухов котла изоляцией, окрашенной в белый цвет.

7. За последние пять лет удалось повысить паронапряжение поверхностей нагрева котла до 85 *кг/м²ч*.

8. Высоких паронапряжений поверхностей нагрева удалось достигнуть благодаря:

а) повышению скоростей газов;

б) уменьшению диаметра кипятильных трубок;

в) содержанию в чистоте внутренних и наружных поверхностей нагрева, из-за чего значительно возросли требования к качеству питательной воды судовых паровых котлов.

9. Паропроизводительность современного водотрубного котла удалось повысить до 100—150 *т/ч*.

---

[1] См. табл. 118.

10. Увеличение паропроизводительности котла достигалось:

а) повышением паронапряжения поверхности нагрева до 85 *кг/м*,

б) увеличением поверхностей нагрева котла до 1000—1500 $м^2$.

Мощные котлы строились обыкновенно с двухсторонним отоплением.

11. Рабочее давление пара в водотрубных котлах нормальной конструкции удалось повысить до 45—60 *ати*.

12. Столь высокого давления в водотрубных котлах достигли благодаря:

а) применению цельнокованных коллекторов цилиндрической формы,

б) замене водяных камер прямоугольной формы камерами цилиндрической формы,

в) утолщению стенок котла,

г) применению для котлостроения сталей повышенного качества.

13. В морской паросиловой установке с поршневыми машинами достигли применения перегрева пара до 350° Ц.

14. Широкое распространение на судах паротурбинных установок позволило увеличить температуру перегрева пара до 450—500° Ц.

15. Унификация — однотипность строящихся водотрубных котлов и их элементов, проводимая с начала XX в., продолжается и в настоящее время:

а) в военном флоте распространяются почти исключительно котлы типов Ярроу и Бабкока и Вилькокса;

б) в последние годы распространение котлов типов Ярроу и Бабкока и Вилькокса сильно возросло и в коммерческом флоте;

в) все котлостроительные заводы переходят к применению коллекторов и водяных камер только цилиндрической формы (новые конструкции котлов Ярроу, SX и др.);

г) заводы отказываются от исключительного применения при постройке котлов прямых трубок. Взамен их котлы изготовляются из изогнутых трубок малого диаметра.

16. Судовые водотрубные котлы являются ведущим типом котлов в военном флоте и, вероятно, скоро займут первое место по распространению их и в коммерческом флоте.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К IX ГЛАВЕ

На русском языке

1. Гусев. Судовые паровые котлы. Л. 1934.
2. Людвиг Е. Справочная книга судового механика. М.-Л., 1935.
3. Невский С. А. Обзор современных конструкций больших заграничных паровых котлов. М.-Л., 1933.
4. Сурвилло В. Л. Энциклопедия судовых механизмов. Котлы. М.-Л., 1931.
5. Титов П. Н. Судовые механизмы. Л.-М., 1933.

На иностранном языке

1. Traill Th-W. Boilers, marine and land, their construction and strength. A handbook of rules, formulae, tables etc. L. and Ch. Griffin and Co. London, 1920.

Журнальная литература

1. Hype A. G. Suggested modifications to marine water-tube boilers. To же см. Shipbuilder Apr. 1929; Schiffbau. 5/VI 1929, Mar. eng-r a. Motorshipb. May 1929; Eng-ng, apr. 1929; TINA. V. 71, стр. 204—224, 1929.
2. Spyer A. The modern developments of the water-tube boiler for marine purposes. Shipbuilder. Apr. 1929. To же см. Eng-ng; III—IV 1929. Shiffbau. VI 1929; Mar. Eng-r a. Motorshipb. May 1929, стр. 185—188; Shipb. a. Shipp. Rec. 1929.
3. Water-tube boilers for merchant hips. Shipbuilder, febr. 1930. To же см. Shipb. a. Shipp. Rec., 1930; Mar. Eng-r a. Motorshipb. juni, 1929.

4. Bleicken B. u. Garweg. Umbau der vier Schiffe der „Albert Ballin"-Klasse der Hamburg-Amerika Linie. W. R. H. Стр. 110—118, 1930.
5. Müller P. Maschinen-technischer Teil des Schiffe „Cap. Arcona". W. R. H. Стр. 479—486, 1927.
6. Chaudières modernes de type moderne. Bull. Technique du Bureau Veritas. № 4, p. 97—103, 1932.
7. Note sur quelques expériences consernant les chaudières à tubes d'eau employées dans la marine de guerre. Bull. techn. du Bureau Veritas. № 5 p. 83—84, 1933.
8. Jones C. aud Solberg T. Marine boilers. Mar. Eng-ng a. Shipp. Age. № 3, p. 100—102, 1935.
9. Évolution de la chaudière moderne. Bull. techn. du Bureau Veritas, № 4, p. 61—64, 1935.
10. Chaudières marines des types nouveaux. Bull. techn. du Bureau Veritas, № 4, p. 65—69, 1935.
11. Hochdruck-Schiffskessel in den neuzeitlichen Ausführungen. Schiffbau. № 64, S. 327—330, 1931.
12. Spyer A. The modern developments of the water-tube boiler for marine purposes. TINA. V. 71. p. 196—203, 1929.
14. Rock G. H. Some observations on the design of airplane carriers and notes on the „Saratoga" and „Lexington". Trans. of the Soc. of Nav. Arch. a. Mar. Eng-rs. N.-Y., v. 36, p. 63—76, 1928.
15. King I. H. Increased economy in marine steam machinery with particular reference to marine boilers. Trans. of the Soc. of Naval Arch. and Marine Eng-rs. Vol. 37, p. 169—200, 1929.
16. Yarrow H. E. High-pressure water-tube boiler for marine purposes. TINA. Vol. 68. p. 142—161, 1926.
17. Yarrow H. E. The design and construction of high-pressure water-tube boilers. Eng-ng. № 3270, 1928.
18. Yarrow H. E. Water-tube boilers in some recent merchant ships with service results. Mar. Eng-r a. Motorshipb. P. 152, Apr. 1931.
19. Yarrow H. High-pressure water-tube boilers for marine purposes, Mar. Eng-r. P. 153—155, 1926.
20. H. M. S. „Acheron" Britain's first high-pressure warship. Mar. Eng-r. p. 247, 1931.
21. High-pressure geared turbine of the steamer „King George V". Mar. Eng-r. P. 366—374, 1926.
22. The Yarrow water-tube boiler. Shipbuilder. № 261, p. 121, 1932.
23. Development in Yarrow boiler design. Mar. Eng-r a. Motorshipb. № 654, p. 92. 1932.
24. Dight. Naval water-tube boilers, experiments and ship trials. TINA. Vol. 75. p. 171—199, 1933; См. тоже, Eng-ng. Boiler House Review. Стр. 38—44, июль 1933.
25. Jones C. A. and Solberg T. A. Marine boilers. Mar. Eng-r and Shipp. Age. № 2, p. 56—59; № 3, p. 100—102; № 4, p. 146—148; № 5, p. 193—195, 1935.
26. The quadruple-screw liner „Conte di Savoia". Eng-ng. № 3507, p. 345—34; № 3510, p. 423—426; № 3513, p. 507—508; № 3516, p. 606—607, 1933.
27. Souvenir number „Conte di Savoia". The Shipbuilder p. 64—65, 66, 76—83, 1933.
28. Машинные установки „Manhattan", „Washington". Shipbuilder. p. 488—495, May 1933.
29. Brierly R. C. Development of B. and W. boilers for naval vessels. Journ. of Amer. Soc. of Nav. Engineers. № 4, 1930.
30. The B. and W. water-tube boilers of the „New Holland". Shipb. a. Shipp. Rec., 27/XII 1928.
31. The Babcock and Wilcox „SX" type marine boiler. Shore trial results with the latest Babcock and Wilcox small tube sectional type boiler installed in H. M. S. „Guardian". The Shipbuilder. № 280, p. 344—346, 1933. Mar. Eng-r. № 669, p. 178—180, June 1933.
32. Jebens. Moderne Hochdrukdampfanlagen für Schiffe. WRH. P. 150—155, 1934.
33. Koch. W. Die Maschinen- und Kesselanlage der Schnelldampfer „Bremen". VDI. P. 693—708, 24/V 1930. То же см. WRH. P. 208—214, 1930.
34. Schnelldampfer „Normandie". Schiffbau. P. 257—273, 1935
35. Bauer G. Die Maschinenanlage des Schnelldampfers „Bremen". WRH. p. 401—402, 1930.
36. B. und W. lightweight marine water-tube boiler. Mar. Eng-r, p. 292—293, 1931.
37. Wagner R. Hochdruck-Dampfturbinenanlage in der Schifffahrt., WRH, p. 268—279, 1930.
38. Gross-Channel steamer „Côte d'Azur". Mar. Eng-r, p. 183—187, 1931. То же см. Bull. Techn. du Bureau Veritas. P. 170—172, 1929. WRH. P. 39, 1930.

39. The Johnson marine water-tube boiler. Remarkable results achieved in test. The Shipbuilder, № 286, p. 46—48, Jan. 1934. То же см. Shipb. and Shipp. Rec., № 24, p. 572, Dec. 1933.

40. Tests ona Johnson water-tube boiler. Mar Eng-r, № 676, p. 25—26; Jan. 1934. Mech. Eng-ng. № 3, p. 176—177, 1934.

41. Johnson-Schiffskessel für die „Asturias". Die Wärme, № 6, S. 87, 1935.

42. Немировский. Новейшие судовые котельные установки. Водный транспорт. № 7, стр. 38—39, 1935.

43. Münzinger F. Ueber leichte Kessel für schnelle Schiffe. „Schiffbau". № 4, 1936.

44. Kleinschmidt und Pruss. Der Doppelschraubenschnelldampfer „Scharnhorst" des Norddeutschen Lloyd. WRH. S. 167—182, 1935.

45. Der transatlantische Schnellpampfer „Normandie". WRH. S. 183, 1935.

46. Bauer. Hochdruck Schiffsturbinenanlagen mit Kesseln für natütlichen Umlauf. „Schiffbau". № 6, 1936.

47. Kamo M. Development of water-tube boilers in Japan. Far East Review. V. 26, № 5 and 6, p. 225—230, 1930.

48. Mellor A. L. Design and performance of the boilers of the „Viceroy of India". Mar. Engr. a. Motorshipb. № 628, стр. 17—18, 1930.

49. Marine steam boiler progress. Eng. and boiler house rev. V. 44, № 1, July 1930.

50. High-pressure boilers for the SS „King George V". Amer. Soc. of Naval Engrs. V. 42, № 4, p. 668—71, Nov. 1930.

51. Brierly R. C. B. a. W. high-pressure sectional express boiler. Am. Soc. of Naval Engrs. V. 43, № 4, p. 511—561, Nov. 1931.

52. Marine steam boiler. Progress Eng. and Boiler House Rev. V. 43, № 1, p. 4—14 and 16—32, 1929.

53. Dight S. R. Experiences with high-pressure steam installations in Royal Navy. Inst. mar. engrs trans. V. 44, p. 571—579, 1932.

54. B. a. W. boilers on SS „Manhattan" and „Washington". Mar. News, № 11, p. 50—51, Apr. 1933.

55. B. a. W. „SX" type marine boiler. Shipbuilder. V. 40, № 280, 1933. См. также: Mar. Engineer. V. 56, № 669, p. 178—180, June 1933, Shipb. & Shipp. „Rec. V. 41, № 22, p. 532—533, June 1933.

56. Johnson naval type boiler. Engineer. V. 156, № 4068, p. 648—649 and 644, dec. 29, 1933.

57. Marine steam boiler progress. Eng. & boiler House Rev. V. 42. № 1, p. 4—32, 1928.

58. Modernmarine steam generation. Mar. engineering a. Ship. Age. V. 33, № 11, p. 596—601, Nov. 1928.

59. Water-tube boilers „Yarrow" type. Mar. Engineering & Ship. Age, V. 31, № 7, p. 403—407, 1926.

60. History and development of the marine boiler Mc Ferland. Mar. Eng. & Ship. Age. V. 31, p. 410—419, Nov. 1926.

61. Yarrow H. E. High-pressure water-tube boilers for marine purposes. Shipb. & Shipb. Rec. V. 27, p. 361—363, 1926.

62. New smal-tube steam generator introduced to marine industry. Boiler maker. V. 32, № 2, p. 26—29, Feb. 1932.

63. Dight S. R. Experiences with high-pressure steam installations in Royal Navy. Inst. Mar-Engrs advance paper. V. 44, p. 8, Dec. 13, 1932.

64. Swan J. Modern trend of marine boiler installations. Boiler maker. V. 32, № 3, p. 52—53, 1932.

65. Water-tube boilers New Grace liners. Mar. News. V. 19, № 8, p. 30—31, Jan. 1933.

66. Hayman W. M. W. and Gregson W. Water-tube boiler and cargo ship. North-East-Coast Inst. Engrs & shipbldrs Trans. V. 49, p. 203—20, 1932—33.

67. Evaporative test of Johnson water-tube boiler. Eng-ng. V. 137. № 3547, p. 19—20, Jan. 5, 1934.

68. Johnson marine water-tube boiler. Eng. & boiler house rev. V. 47, № 7, p. 436—37, 1934.

69. Jones C. A. and Solberg T. A. Marine and naval boilers. Soc. of Naval Arch. & Mar. Engrs. advance paper. № 10, p. 20, Nov. 15 and 16, 1934.

70. Водотрубный котел завода „Ленинская кузница" в г. Киеве. „Судостроение". № 7, стр. 507—510, 1936.

71. Muller F. Stoomketels met ribbenbuizen Systeems R. L. — Ingenieur. V. 47, № 18. p. 59, Apr. 29, 1932.

ГЛАВА X

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ И КОТЛЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СУДОВЫХ КОТЛОВ

218. Котлы Ла Монта

За последние 10—15 лет особенно сильно возросли требования к повышению паропроизводительности котлов как в военном, так и в торговом флоте. Попытки форсировать работу котлов старой конструкции часто заканчивались неудачей. В топках от действия высоких температур получались течи в трубных досках. В водотрубных котлах часто перегорали кипятильные трубки, главным образом из-за недостаточной циркуляции воды в них. Весьма быстро под действием раскаленных газов изнашивалась и кирпичная кладка.

Все это заставило ряд заводов и изобретателей заняться изысканием средств, понижающих топочные температуры, при одновременном сохранении высоких нагрузок котла.

Одним из наиболее реальных средств борьбы с высокими температурами в топке оказалось изобретение Ла Монта [1]. Для понижения температуры в топке он предложил располагать в ней экраны с принудительной циркуляцией и принудительным распределением воды по отдельным трубкам экрана.

Первая опытная установка Ла Монта была построена в 1925 г. С тех пор по 1935 г. находилось в эксплоатации и постройке 150 котлов Ла Монта общей паропроизводительностью в 1500 *т* (из них 18 установлено на судах) [2]. Судовые котлы Ла Монта начали строить лишь с 1931 г. Большинство судовых котлов Ла Монта было по существу топочными экранами. Ниже мы приводим описание нескольких конструкций судовых топочных экранов и котла Ла Монта.

Котельная установка парохода «Штасфурт» состояла из двух двойных и двух ординарных цилиндрических котлов. Суммарная поверхность нагрева котлов равнялась 1500 *м*². В связи с переводом двух двойных котлов на пылеугольное отопление пришлось один ординарный котел удалить и на его место поставить угольные мельницы.

---

[1] Патент на экран Ла Монта опубликован в Германии 6/IV 1933 г. См. DRP, № 575321. Заявлен патент в 1925 г. Патент на котлы Ла Монта опубликован в Германии в 1933 г., см. DRP, № 568922. Заявлен патент 26/VI 1928 г. Нем. пат. № 626339, 1931 г. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. 1933.

[2] Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Стр. 97. O. Ruschwegh. Der La Mont Dampferzeuger, seine Entwicklung, zum Niederdruck und Höchstdruck-Schiffskessel. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 178—205, 1933.

Эксплоатация котлов с пылеугольным отоплением дала хорошие результаты в отношении их паропроизводительности. Однако, поддерживать нормальную работу котлов более или менее продолжительное время было невозможно. В топке наблюдались весьма высокие температуры, и обнаруживались течи в швах и в трубных досках. Для устранения течи было решено понизить температуру топки путем постановки в жаровые трубы экранов системы Ла Монта (рис. 347).

Центробежный электронасос всасывал воду из нижней части коллектора и нагнетал ее в распределительную коробку, откуда вода распределялась по пяти трубкам диаметром 30/38 *мм* и длиной 17 *м*. Полученная в экранных трубках пароводяная смесь направлялась в паровое пространство котла. Пройдя трубки, вода частично превращалась в пар.

Кратность циркуляции воды в экране поддерживалась равной 7—8, а средняя скорость пароводяной смеси в трубке была равна 8 *м/сек*.

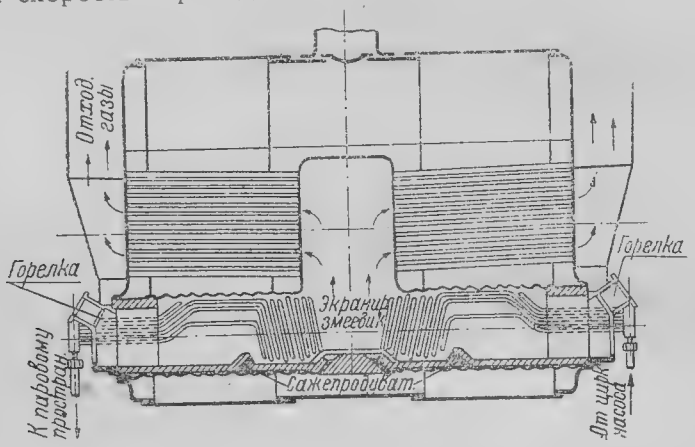


Рис. 347. Экран Ла Монта для шотландского котла пылеугольного отопления на пароходе „Stassfurt".

Поверхность нагрева экранов Ла Монта составляла 82 *м*² или 6,5% от общей поверхности котла. Эксплоатационная проверка работы рассмотренных котлов с экранами Ла Монта вполне оправдала расчеты конструкторов. Паропроизводительность котлов повысилась с 27 до 32 *т/ч*, т. е. на 18,5%. Несмотря на увеличение паропроизводительности котла, к. п. д. увеличился с 80 до 82%.

Для большей надежности работы экрана каждая установка была снабжена сигнальными автоматами. В случае повреждения питательной системы (циркуляционный насос, трубопровод и др.) подавался сигнал, по которому питание экрана переключалось на ручное. Подпитывание экрана вручную производилось лишь до тех пор, пока в топке не прекращали огонь.

Уголь для отопления применялся вестфальский, мелкий, с содержанием летучих веществ до 26% и температурой плавления шлаков в 1300° Ц.

Другая установка экрана Ла Монта была выполнена для вспомогательного котла парохода «W. A. Riedemann» (рис. 348). Поверхность нагрева котла 120 *м*² и экрана $3 \times 4 = 12$ *м*². Давление пара в котле и экране равнялось 8 *ати*. Для удобства обслуживания топки все трубопроводы и циркуляционный насос располагались за котлом.

Экраны Ла Монта устанавливались и под водотрубными котлами. Так, ими были снабжены вспомогательные водотрубные котлы нефтяного отопления на немецких пароходах «Deutschland» и «Ballin». Котлы имели поверхность нагрева 500 $м^2$ каждый.

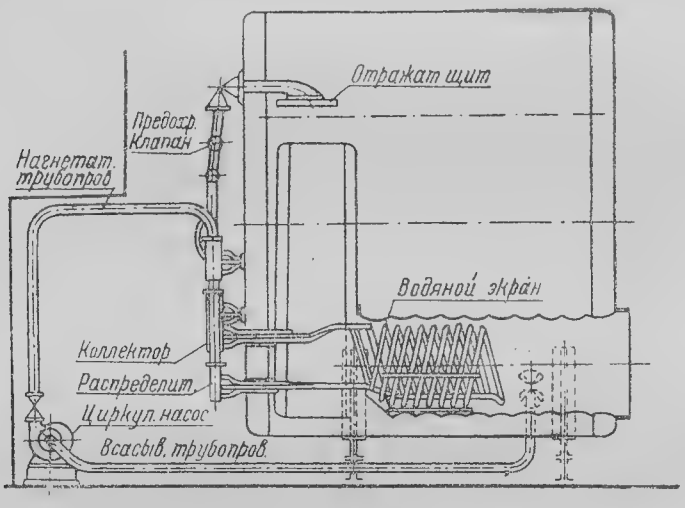


Рис. 348. Экран Ла Монта в топке шотландского котла.

На рис. 349 показан схематический чертеж котлов с экраном. Путь воды и пара в экране показан стрелками. Экраны для этих двух пароходов, как и для парохода «Stassfurt», были выполнены фирмой

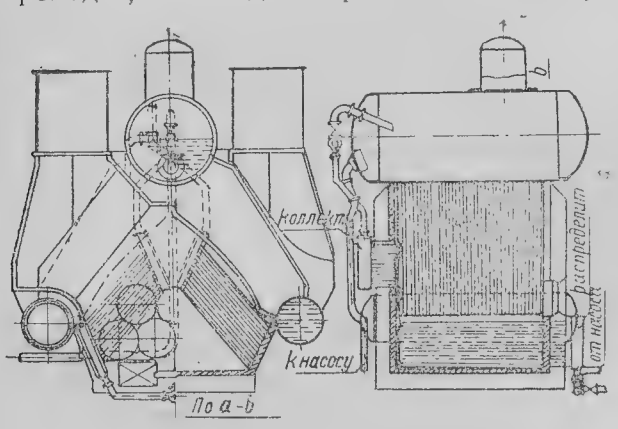


Рис. 349. Экран Ла Монта к водотрубному котлу.

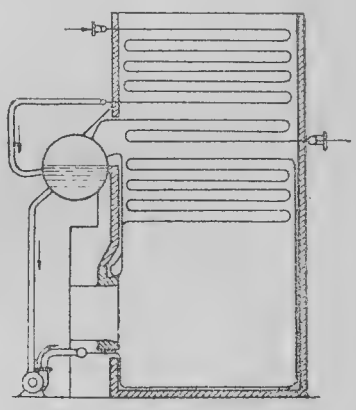


Рис. 350. Схема котла Ла Монта.

Blohm & Voss (Hamburg). После установки экранов в дымовых трубках не наблюдалось недопустимо высоких температур газов. Нагрузка котла по расходу топлива увеличилась с 1,7 *т* нефти в час до 2,2 *т/ч*, а температура уходящих газов понизилась до 350°, что вызвало значительное увеличение к. п. д. котла.

Ла Монт строил не только экраны, но и котлы.

На рис. 350 дана схема котла Ла Монта. Как показано стрелками, вода из питательного насоса сначала поступает в расположенный

вверху водяной экономайзер. В экономайзере вода нагревается до температуры, близкой к температуре кипения. Из водяного экономайзера вода входит в паровой коллектор. Из последнего вода засасывается циркуляционным насосом и прогоняется им через трубки. В трубках происходит превращение в пар от 10 до 20% воды, прокачиваемой через них. Образовавшаяся в трубках пароводяная смесь входит в паровое пространство коллектора. Из парового коллектора пар поступает в пароперегреватель и, наконец, уходит к двигателю. Пароперегреватель расположен между пучками труб экономайзера и котла.

Исследования работы котла с принудительной циркуляцией показали, что вода распределяется по отдельным трубкам неравномерно. Кроме того в трубки, которым передается больше тепла, поступает

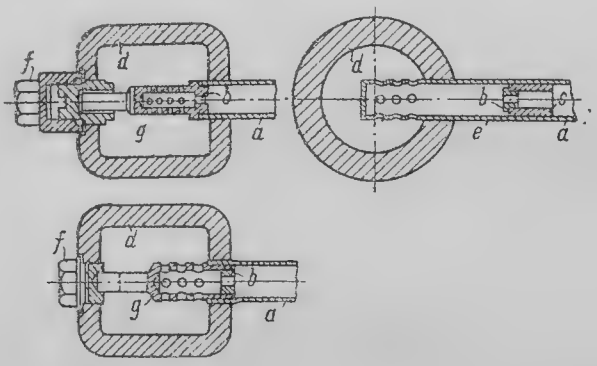


Рис. 351. Дроссельные шайбы с защитными сетками.

a — паровая труба; *b* — сопловая вставка; *c* — вставная втулка; *d* — распределитель; *e* — ввинченный отрезок трубы; *f* — запорная пробка; *g* — соплодержатель.

меньше воды, так как сопротивление в них больше. Это объясняется большим паросодержанием воды и высокими скоростями пароводяной смеси в данных трубках.

Распределение воды по трубкам нарушается при изменении нагрузки котла. Стремление свести к минимуму неравномерность распределения воды по трубкам и сделать распределение воды по трубкам независимым от нагрузки котла привело к мысли поставить в начале трубок дроссельные шайбы. Последние должны создавать сопротивления, в несколько раз превышающие наибольшие сопротивления в трубках.

Из всех применяемых дроссельных шайб на практике хорошо зарекомендовали себя шайбы, показанные на рис. 351. Диаметр отверстий шайб принимается обычно равным 5—10 *мм*. Постановка дырчатых колпачков перед дроссельными шайбами была продиктована желанием уменьшить вероятность засорения их илом.

При помощи дроссельных шайб удавалось достигать сравнительно равномерного распределения воды по трубкам, что практически не нарушалось и при изменениях нагрузки. Изменения сопротивления воды в отдельных трубках при изменении нагрузки оказывали весьма малое влияние на изменение сопротивления во всей цепи движения воды.

В процессе эксплоатации котлов Ла Монта выработалось требование производить регулярные продувки трубок котла, что уменьшало возможность засорения дроссельных шайб. Производят про-

дувку таким образом. Останавливают циркуляционный насос и отключают его от парового коллектора. Затем открывают клапан продувания. Вода под напором давления в котле течет через сопла в обратном направлении. В дроссельных шайбах происходит парообразование. Образующаяся в шайбах пароводяная смесь способствует хорошей продувке дырчатых колпачков. Для поддержания нормальной солености воды в котле необходимо производить периодическую или непрерывную продувку воды из парового коллектора.

Эксплоатационными и опытными наблюдениями установлено, что для нормальной работы котла Ла Монта необходимо прогонять через трубки воды в 5—10 раз больше паропроизводительности трубок или, как принято называть, необходимо поддерживать кратность циркуляции равной 5—10.

Одновременно эксплоатация котлов Ла Монта на судах показала, что циркуляционные насосы должны устанавливаться не менее, чем на 1,5 *м* ниже уровня воды в паровом коллекторе. В противном случае уменьшается надежность работы насоса из-за возможности парообразования в нем.

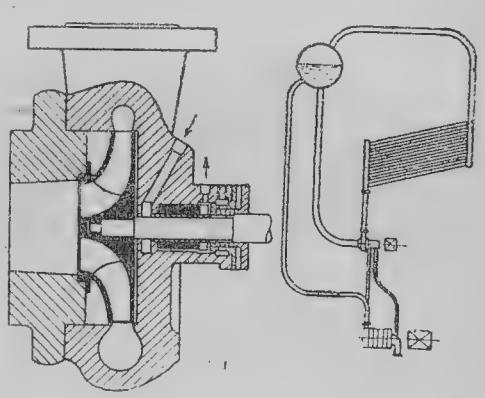


Рис. 352. Схема уплотнения питательной водой перекачивающего насоса.

Расход энергии на циркуляционный насос составляет примерно 0,5—0,7% мощности котла. Напряжение парового коллектора равно 500 $м^3$ пара в 1 час на 1 $м^3$ парового пространства при питании котлов морской водой северного моря. Паронапряжение парового объема в коллекторе котлов Ла Монта удавалось доводить до 1 400 $м^3/м^3ч$ при питании его конденсатом.

Таким образом, основной отличительной особенностью котлов Ла Монта является применение дроссельных шайб и принудительной циркуляции воды. Принудительная циркуляция в котлах Ла Монта осуществляется центробежным насосом. Расположение колеса на свободном конце вала позволяет уплотнить только один сальник (рис. 352). Сальник охлаждается водой.

Фирма Клейн-Шанумин-Беккер разработала специальную конструкцию уплотнения с водяным затвором, при которой утечка воды из насоса составляет не более 1 *л* в час при давлении в 60—80 *ат*. Вода в уплотнение подавалась питательным насосом. Из уплотнения вода направлялась к всасывающему патрубку питательного насоса.

Для более совершенного отделения воды от пара перед входом пароводяной смеси в паровой коллектор устанавливался отбойный лист.

Как показали наблюдения, ввод пароводяной смеси в паровое пространство дает небольшую влажность пара, и, наоборот, подвод пароводяной эмульсии ниже уровня воды влечет за собой образование в котле толстого слоя пены и увеличение влажности пара.

Гидравлические сопротивления нагнетательного трубопровода и кипятильных труб равны приблизительно 2,5 *ати*. Циркуляционный насос должен создавать напор, равный рабочему давлению + 2,5 *ати*. Давление на всасывающем патрубке циркуляционного насоса равно котельному давлению. Длину кипятильных трубок и их диаметр

выбирают таким образом, чтобы скорость воды в кипятильных трубках непосредственно за соплом была равна примерно 2 *м/сек*. Производительность циркуляционного насоса рассчитывается так, чтобы количество воды, прокачиваемой через котел экрана, примерно в 8 раз превышало количество пара, снимаемого с трубок котла. При этом условии выделенный нами объем воды должен проциркулировать по экрану 8 раз, пока полностью не испарится, т. е. кратность циркуляции в данном котле равна 8.

История теплотехники показывает, что идея Ла Монта не нова. Экраны и принудительная циркуляция воды применялись еще в XIX в.

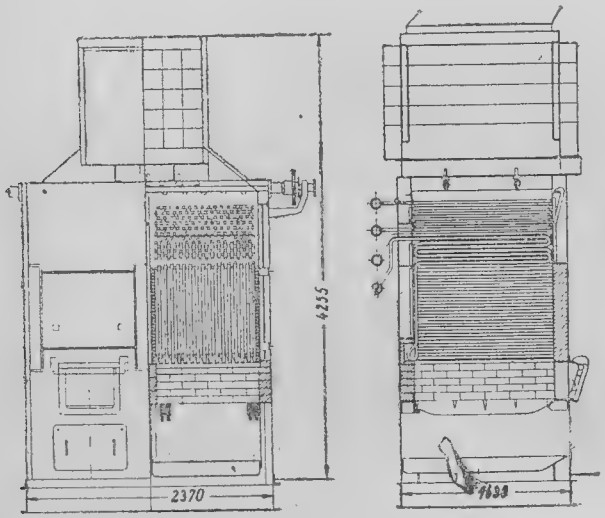


Рис. 353. Котел Ла Монта.

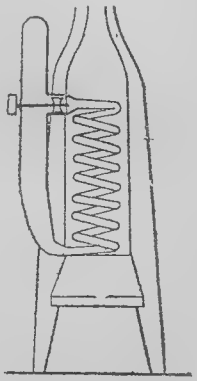


Рис. 353а. Схема котла с принудительной циркуляцией.

На рис. 353а показана схема котла с принудительной циркуляцией, запатентованного Джоном Эльдером (John Elder) в 1862 г.

Идея искусственной циркуляции выдвигалась в XIX в., помимо Эльдера, и многими другими изобретателями, но она не получила тогда распространения, главным образом, потому, что технические средства не позволяли выполнить надежно работающий циркуляционный насос.

Техника водоочистки была также на весьма низком уровне. Вода, прогоняемая через змеевики, имела много посторонних примесей, которые могли оседать на трубках и вызывать их пережог. Котел Эльдера не был применен в промышленности. Экранные же котлы Ла Монта получают широкое распространение на судах с 30-х гг. XX в.

В заключение приведем описание котла Ла Монта, установленного на пароходе «Bremen» об-ва «Neptun». Котел двухтопочный цилиндрический с поверхностью нагрева в 96 *м*². Рабочее давление в котле поддерживалось равным 12 *ати*. На пароходе был еще один вспомогательный котел ($H_к = 15$), производящий пар давлением в 7 *ати*. Вместо этих котлов поставили один котел Ла Монта. Последний должен был поставлять в 1 час 2,5 *т* пара давлением 12 *ати* и температурой перегрева 270° Ц. Устройство котла ясно видно из рис. 353. Вода из вертикально стоящего парового коллектора прогонялась по

трубкам котла и снова поступала в паровой коллектор. В нем происходила сепарация воды от пара. Вода опять всасывалась из коллектора и нагнеталась в трубки котла. Пар направлялся в пароперегреватель, расположенный под конвекционной частью поверхности нагрева котла.

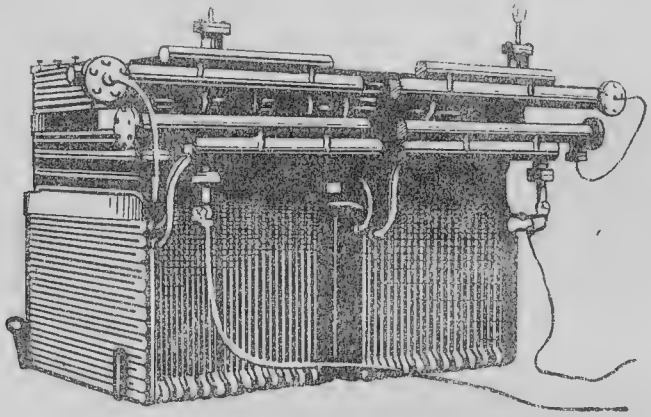


Рис. 354. Котел Ла Монта без кожуха.

Устройство перегревателя, конвекционной и радиационной части поверхности нагрева показаны на рис. 354, 354а. Над перегревателем расположен еще игольчатый экономайзер (рис. 355). Питательная вода до поступления в паровой коллектор нагревается в паровом подогревателе и в игольчатом экономайзере. Для более полного представления о характеристиках котла приводим основные данные испытания его (табл. 131).

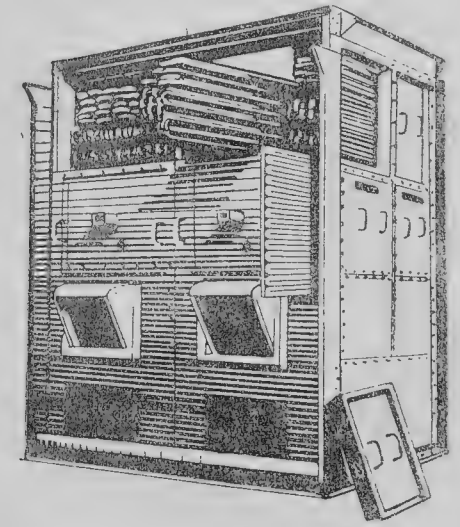


Рис. 354а. Котел Ла Монта.

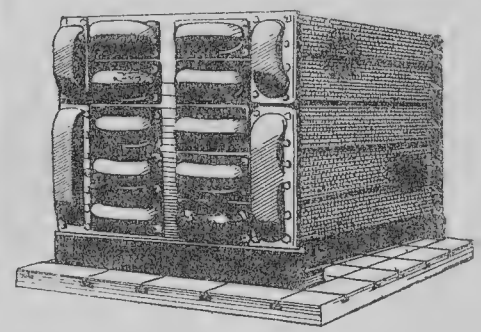


Рис. 355. Игольчатый экономайзер котла Ла Монта.

Общий к. п. д. установки, включая потери энергии на работу циркуляционного насоса и вентилятора, равнялся 77%.

Эти данные и хорошие отзывы о работе котлов Ла Монта дают возможность предполагать, что в дальнейшем они получат более широкое распространение.

Таблица 131

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Поверхность нагрева котла лучевоспринимающая	$H_р$	$м^2$	13,5
2	Поверхность нагрева котла конвекционная	$H_к$	„	37,5
3	Поверхность нагрева котла общая	ΣH	„	51
4	Поверхность нагрева перегревателя	$H_{пе}$	„	190
5	Поверхность нагрева водяного экономайзера	$H_{в.э.}$	„	76,5
6	Площадь колосниковой решетки	R	„	2,48
7	Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	117,5
8	Тепловое напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	$кал/м^3ч$	600 000
	Вода и пар			
9	Температура питательной воды перед экраном	$t'_{эк}$	°Ц	63,4
10	Температура питательной воды за экраном	$t''_{эк}$	°Ц	141
11	Давление пара	P	*ати*	13,05
12	Температура перегретого пара	$t''_{пе}$	°Ц	284
13	Испарено воды за час	$D_ч$	*кг/ч*	2 441
14	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м ч*	47,8
15	Паронапряжение поверхности нагрева котла, перегревателя и водяного экономайзера	$\frac{D}{H_{к+п+в.э}}$	$кг/м^2ч$	16,7
	Дымовые газы			
16	Температура газов перед экономайзером	$T'_{эк}$	°Ц	400
17	Температура газов за экономайзером	$T''_{эк}$	°Ц	236
18	Содержание углекислоты перед перегревателем	$(CO_2)'_{пе}$	%	14,8
19	Содержание углекислоты за дымовой трубой	$(CO_2)_{д.тр}$	%	12
20	Испарительность угля	$И_в$	*кг/кг*	8,37
21	Нормальная испарительность угля	$И_{ст}$	„	8,6
	Уголь			
22	Низшая теплотворная способность рабочего топлива	$Q^р_н$	*кал/кг*	7 030
23	Содержание летучих в топливе	$Л$	%	24,8
24	Содержание воды в топливе	$W^р$	%	4,16
25	Содержание золы в топливе	$A^р$	%	10,5

Продолжение табл. 131

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
	Тепловой баланс котла			
26	Использовано тепла экономайзером . .	$q_{эк}$	%	9,20
27	Использовано тепла котлом	$q_к$	%	62,5
28	Использовано тепла перегревателем .	$q_{пе}$	%	6,3
29	Всего использовано поверхностью нагрева котла, перегревателя и экономайзера	$q_{к+пе+в.э}$	%	78
30	Потери тепла с уходящими газами . .	q_2	%	12,7
31	Потери в окружающую среду и др. . .	q_5	%	9,3
32	Всего потерь	$\Sigma q_{пот}$	%	22

219. Котел Велокса

В результате непрерывно возрастающих требований повышения к. п. д., уменьшения веса и габаритных размеров паровых котлов появилась весьма интересная конструкция котла Велокса[1]. Котел Велокса был создан в 1932 г. конструкторами фирмы Броун-Бовери.

Основными особенностями котлов Велокса являются:

1) сжигание топлива под давлением в 1—2 *ати*;

2) использование энергии уходящих газов в газовой турбине, которая приводит в действие компрессор, нагнетающий воздух в топку;

3) повышение скоростей газов до 100—200 *м/сек* против 10—20 *м/сек* в котлах нормальных конструкций. Высокие (до 200 *м/сек*) скорости газов дали возможность повысить паронапряжение поверхности нагрева котла до 500 *кг/м²ч*, т. е. примерно в 10 раз.

Применение высоких скоростей газов для увеличения теплопередачи от газов к испаряемой воде (или, что все равно, для повышения паропроизводительности поверхностей нагрева) было известно уже давно. В 1906 г. Никольсон провел опыты по исследованию теплопередачи и парообразования в действующем котле при увеличении скоростей газов до 46 *м/сек*. Опыты Никольсона показали, что такое увеличение скоростей газов в котле увеличило удельную паропроизводительность котла, а стало быть, уменьшило его вес и габаритные размеры на 1 *т* производимого пара. Для получения больших скоростей газов приходилось в топке создавать давление, в десятки раз превышающее ранее применяемое. В котельных нужно было устанавливать мощные турбовоздуходувки, но практическое и рентабельное применение больших скоростей газов возможно при условии постройки новой экономической, небольшой по весу и габаритам, турбовоздуходувки. В процессе опытов выяснилось, что для больших скоростей газов необходимо разработать совершенно новую

[1] Engineering, 1934, 20/IV, стр. 469—472 } Swallow M.
„ „ 4/V, стр. 526—528 } Парогенератор типа Велокс.

конструкцию котла. Ни теплотехники, ни котлостроительные заводы не могли тогда построить котел и воздуходувку, удовлетворяющие новым требованиям, и идея применения в котлах высоких скоростей газов была забыта. Решить эту задачу удалось лишь примерно 20 лет спустя, когда уровень науки и техники значительно вырос.

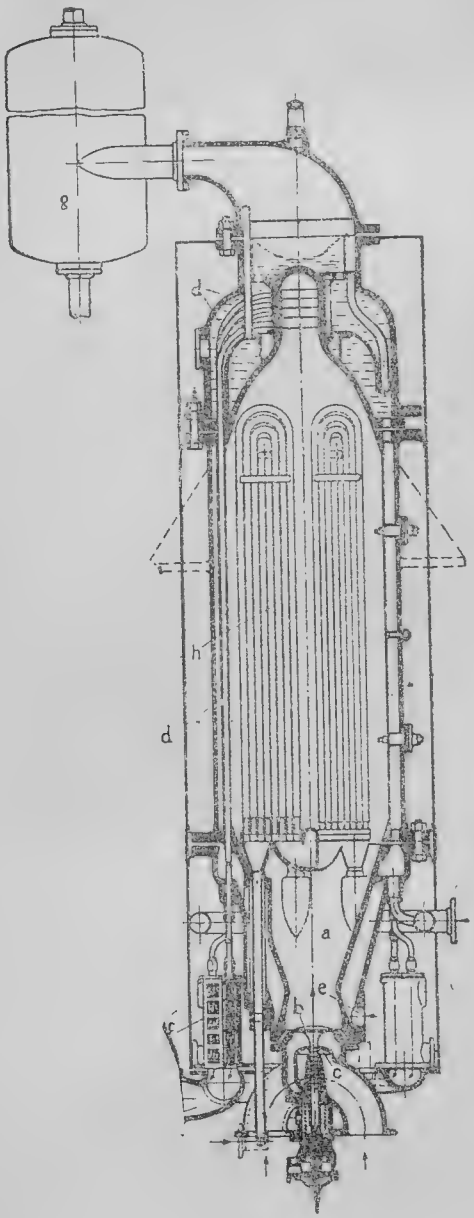


Рис. 356. Котел Велокса.

a — камера горения; *b* — смешивающий клапан; *c* — газовый клапан; *d* — дымогарные трубы; *e* — приток циркулирующей воды; *f* — подогреватель питательной воды; *g* — сепаратор пара; *h* — перегреватель; *i* — сборная труба для выхлопных газов.

Мысль об использовании преимуществ высоких скоростей газов в котлах родилась в процессе работы над газовыми турбинами. Во время опытов с последними было установлено, что создание экономичной и годной для эксплоатации газовой турбины возможно лишь при условии использования тепла, которое уходило с водой, охлаждающей газовую турбину. Использование теплоты с уходящей водой в эксплоатационных установках предполагалось производить так. Воду, охлаждающую газовую турбину, превращали в пар. Последний решили использовать для работы паровой турбины, приводящей в действие воздуходувку. Воздуходувка должна была производить наддув воздуха в газовую турбину. Такая установка может рассматриваться как имеющая паровой котел, в котором топливо сгорает под повышенным давлением. В процессе дальнейшей работы с газовой турбиной появилась мысль считать основным элементом комбинированной котлогазотурбинной установки котел, а не газовую турбину. Последнюю предполагалось использовать для привода в действие воздуходувки. Одна из первых конструкций котла такой котлотурбинной установки показана на рис. 356. Вода, так же, как и в котле Ла Монта, всасывалась циркуляционным насосом из сепаратора пара *g* и прогонялась вокруг дымогарных трубок *d*. Получаемая пароводяная смесь направлялась в сепаратор, где пар осушался. Из сепаратора *g* пар направлялся в пароперегреватель *h*, расположенный в топке, а вода снова засасывалась циркуляционным насосом, и цикл движения воды и пара повторялся.

Процесс горения топлива в котле схематически может быть представлен так. Камера горения при помощи наддувной воздуходувки периодически заряжается смесью горючего и воздуха. Затем закрывается смешивающий клапан *b*, и воспламеняется горючая смесь. От получившейся вспышки давление, созданное воздуходувкой, повышается с 2 до 8—10 *ати*, т. е. в 4—5 раз.

После короткого промежутка времени, нужного для полного сгорания нефти, открывается выпускной газовый клапан *c*, расположенный в конце дымогарных трубок. Открытие его дает свободный выход дымовым газам. Последние, образовавшись в камере *a* в процессе горения топлива с большой скоростью (400—200 *м/сек*), омывали трубки пароперегревателя, расположенного в топке. Затем примерно с такими же скоростями газы проходили сверху вниз в дымогарные трубки.

Большие скорости газов в перегревателе и в дымогарных трубках котла достигались увеличением в камере сгорания давления до 8—10 *ати*. Из дымогарных трубок газы направлялись в газовую турбину через газовый выпускной клапан *c*. Последний открывался для пропуска газов лишь в периоды повышения давления их в камере сгорания и газоходах. Когда давление в камере понижалось до давления, создаваемого воздуходувкой, тогда выпускной клапан закрывался. Вслед за этим открывались клапан для выпуска газов в атмосферу и впускной клапан *b*, через который в камеру горения поступали продувочный воздух и новый заряд горючей смеси. Последние своим давлением вытесняли остатки продуктов горения через дымогарные трубки и воздушный клапан. После этого рабочий цикл вновь повторялся. Число рабочих циклов в камере колебалось в пределах от 40 до 60 ц/мин. Процесс сгорания смеси в камере рассматриваемого котла происходил примерно так же, как и в двигателе внутреннего сгорания. Управление выпускными клапанами, а также запалом, производилось автоматическими масляными регуляторами.

Как показали опытные наблюдения, затраты мощности на приведение в действие воздуходувки составляли примерно от $^1/_4$ до $^1/_{10}$ мощности паровой турбины. Энергия, затрачиваемая на турбовоздуходувку, не пропадала. Она почти полностью возвращалась в камеру горения в виде тепла, передаваемого воздуху, сжимаемому воздуходувкой.

В процессе опытов выяснилось, что мощности одной газовой турбины нехватало для привода воздуходувки. Пришлось поставить еще вспомогательный электромотор, мощностью от $^1/_9$ до $^1/_3$ мощности газовой турбины, для помощи последней в необходимых случаях.

Эксплоатационные наблюдения над работой установки показали, что при таком способе генерации пара представлялась возможность повысить паронапряжение поверхности нагрева котла до 400—500 *кг/м²ч*. Одновременно к. п. д. котла повышался до 90 и выше процентов, включая расходы энергии на турбовоздуходувку и циркуляционный насос. Все это давало большие возможности в отношении сокращения веса и габаритных размеров котельной установки.

Установка имела и ряд недостатков, а именно:

1) топливом для рассматриваемого котла в то время могла служить лишь легко воспламеняющаяся нефть,

2) температура пароперегревателя и отдельных частей котла изменялась во время каждого цикла сгорания,

3) периодические колебания температуры вызывали в материале вредные термические напряжения,

4) устройство клапанов и регулирующих приспособлений для закрытия и открытия их усложняло конструкцию котлов.

Все это побудило практических работников попробовать вести горение в топочной камере при постоянном давлении. Проведенные опыты показали, что при постоянном давлении горение протекало более спокойно, причем интенсивность парообразования получалась примерно такая же, как и при взрывном горении. С тех пор основное

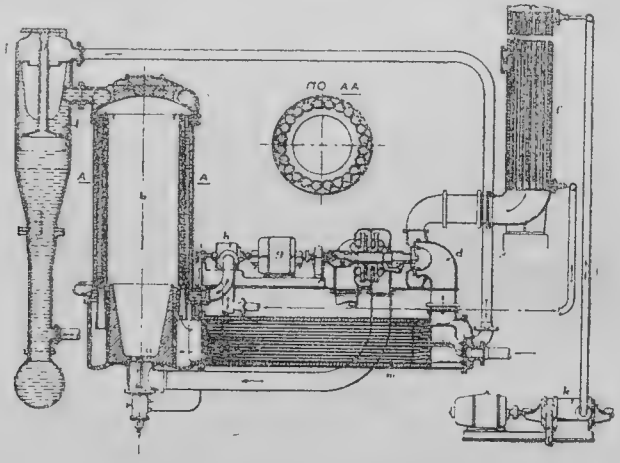


Рис. 357. Котел Велокса.

a — горелка; *b* — топочная камера; *c* — кипятильные трубки; *d* — пароперегреватель; *e* — газовая турбина; *f* — экономайзер, встроенный в трубу; *g* — компрессор; *h* — зубчатая передача; *i* — вспомогательный мотор для пуска и регулирования; *k* — циркуляционный насос; *l* — топливный насос; *m* — центробежный сепаратор пара; *n* — успокоительный резервуар; *o* — питательный насос.

Рис. 357а. Кипятильные трубки котла Велокса.

внимание при исследовании работы котлов с наддувом было обращено на котлы, работающие при постоянном давлении.

Ниже мы приводим описание котла, в топке которого сжигание топлива происходило при постоянном давлении. Как видно из рис. 357, 357а, конструкция парогенератора в этой установке значительно проще, чем в предыдущей. Работа котла схематически может быть представлена так. Газы, образующиеся в топке при горении топлива, проходят со скоростью около 200 *м/сек* в дымогарные трубки. Из последних газы направляются в пароперегреватель *m* и затем поступают в газовую турбину *e*, где отдают часть своей энергии и уходят через водяной экономайзер *f* в дымовую трубу. На одном валу с газовой турбиной сидит электромотор *g*, который дает ей в нужный момент дополнительную мощность. Рядом с электромо-

тором поставлен циркуляционный насос h, создающий принудительную циркуляцию воды в парогенераторе. Естественная циркуляция воды в котле была бы недостаточна, так как поверхности нагрева данного котла воспринимают примерно в 10 раз больше тепла, чем поверхности нагрева котла у лучших водотрубных котлов.

Для лучшего осушения пара в вертикально стоящем коллекторе котла устанавливается центробежный сепаратор. Пар, осушенный в сепараторе, поступает в пароперегреватель, а вода снова засасывается циркуляционным насосом и нагнетается в котел.

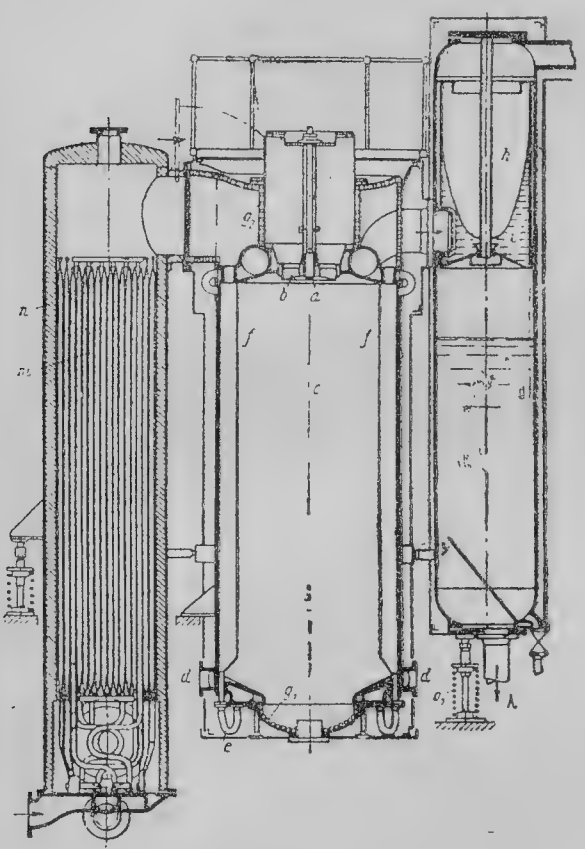


Рис. 358. Новая конструкция котла Велокса.

a — нефтяная форсунка; b — направляющий аппарат для воздуха; c — топочная камера; d — вход питательной воды; e — обводные трубки; f — кипятильный элемент; g_1 — g_2 — экраны для охлаждения топки; h — барабан-сепаратор; i — сито; k — подвод воды к перекачивающему насосу; l — вход пара в перегреватель; m — трубки перегревателя; n — обмуровка; o_1 o_2 — пружинные опоры.

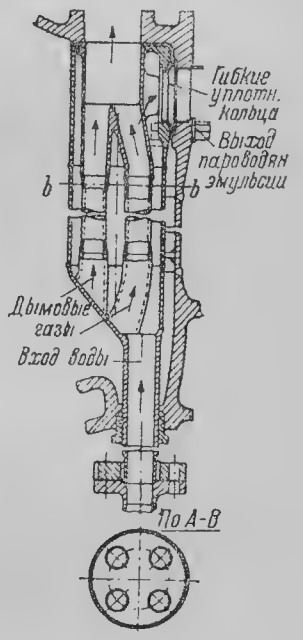


Рис. 359. Кипятильный элемент котла Велокса новой конструкции.

Движение газов, воды и пара в котле указано стрелками.

В последнее время котел Велокса был значительно усовершенствован (рис. 358). В новой конструкции котла совершенно отсутствует кирпичная кладка, которая увеличивала его вес, а главное, быстро изнашивалась вследствие высоких температур в топке. Вместо кирпичной кладки на поду топочной камеры расположен трубчатый водяной экран g_1.

Установка получается более компактной, так как перегреватели m в ней расположены не горизонтально, а вертикально. Отличительной особенностью данной конструкции является также устройство кипятильных элементов (рис. 359). Процесс парообразования и движения газов в котле протекает, как и в предыдущей конструкции.

Таблица 132

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Лучевоспринимающая поверхность нагрева котла	$H_л$	$м^2$	21,2
2	Конвекционная поверхность нагрева котла	$H_к$	„	31,5
3	Поверхность нагрева пароперегревателя	$H_{пе}$	„	95,5
4	Поверхность нагрева водяного экономайзера	$H_{эк}$	„	182,0
5	Объем топочной камеры	$V_т$	$м^3$	3,8
6	Топливо — мазут	$Q^р_н$	*кал/кг*	9 517
7	Дата испытания	—	—	2/VIII 1934
8	Продолжительность испытания	Z	час	0,55
9	Давление по барометру	B	*ата*	0,985
10	„ за компрессором	$P''_к$	„	2,985
11	„ газа перед турбиной	$(P_2)'_т$	„	2,307
12	„ „ за турбиной	$(P_2)''_г$	„	1,169
13	„ „ за экономайзером	$P''_{эк}$	„	1,069
14	„ питательной воды перед экономайзером	$P'_{эк}$	„	32,6
15	Давление пара за перегревателем	$P'_{пе}$	„	28,2
16	„ мазута перед форсунками	$P'_ф$	„	23,5
17	Температура дутья (воздуха, поступающего в топку)	$(t_в)'_т$	°Ц	28,9
18	Температура газа перед турбиной	$(t_г)'_т$	°Ц	533,7
19	„ „ за турбиной	$(t_г)''_т$	°Ц	427
20	„ „ за экономайзером	$(t_г)_{эк}$	°Ц	128,7
21	Коэфициент избытка воздуха за экономайзером	α	—	1 051,06
22	Температура питательной воды перед экономайзером	$(t_в)'_{эк}$	°Ц	55,4
23	Температура пара за перегревателем	$t''_{пе}$	„	461,8
24	Температура мазута за подогревателем	$(t_н)''_{под}$	„	104
25	Расход мазута в час	$B_ч$	*кг/ч*	2 842
26	Испарено воды в час	$D_ч$	„	33 700
27	Передано тепла пару	$Q_п$	млн. *кал/г*	25,346
28	Подведено тепла пару с топливом	$Q_т$	„	27,047
29	Затрачено тепла на подогрев топлива	$Q_{под}$	„	0,107
30	Всего подведено тепла	$Q'_т$	„	27,197
31	Напряжение топочного пространства	$\frac{Q}{V_т}$	$т \cdot кал/м^3ч$	7 120
32	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	640
33	Паронапряжение суммарной пов. нагр. экономайзера, перегревателя и котла	$\frac{D}{H_{к+пе+эк}}$	„	102

Продолжение табл. 132

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
34	Давление газов при входе в дымовую трубу	$\Delta S_{тр}$	*мм* вод. ст.	825
35	Фактическая мощность, развиваемая вспомогательным мотором	$N_{в.м}$	*квт*	130,5
36	Мощность мотора, затрачиваемая на работу циркуляционного насоса . . .	$N_{ц.н}$	„	20
37	Экономический к. п. д. котла	$\eta_{эк}$	%	90,25
38	Потеря тепла с уходящими газами . .	q_2	%	3,95
39	Потеря тепла в окружающую среду . .	q_5	%	3,15
40	Служебные расходы (циркуляционный насос и воздуходувки)	$q_{сл}$	%	2,65
				100%

Более подробные конструктивные и опытные характеристики котла Велокса мы даем в табл. 132, к которой приведены результаты испытаний данного котла, установленного на Баденском заводе Броун-Бовери (Швейцария). Испытуемый котел был рассчитан на нормальную паропроизводительность в 32 *т/ч* и максимальную в 34,5 *т/ч*.

Данные табл. 132 указывают на весьма большие преимущества котла Велокса, а именно паронапряжение поверхности котла составляло 640 *кг/м²ч*, т. е. приблизительно в 10 раз больше, чем у котла нормальной конструкции.

Если же отнести часовой съем пара к суммарной поверхности нагрева всего агрегата, то и в этом случае паронапряжение получится равным 102 *кг/м²ч*. Весьма высоким в котлах этого типа является тепловое напряжение топки. Во время опытов оно равнялось $\frac{Q}{V_т} = 7120$ *т · кал/м³ч*.

Из-за ограниченных в данной установке размеров дымовой трубы в ней возникали высокие газовые сопротивления. Повышенные газовые сопротивления дымовой трубы обусловили собой сравнительно низкий к. п. д. установки. Если учесть понижение сопротивлений в дымовой трубе, то к. п. д. котла можно было бы увеличить с 90,25 до 92,5%. В сравнении с другими котельными установками к. п. д. котлов Велокса получается весьма высоким, что также ставит его в чрезвычайно выгодное положение.

Специально проведенные испытания о характере изменения к. п. д. при разных нагрузках котла дали весьма удовлетворительные результаты. Как показывает табл. 133, к. п. д. котла при понижении нагрузки до 25% от нормальной понизился лишь на 3,5%. Такие данные пока еще не получены ни на одном котле.

Для более полного представления о характеристиках котла Велокса приведем еще данные о пуске котла. Во время испытаний рассматриваемый котел все время находился в эксплоатации, поэтому нельзя было произвести опыт с пуском его из холодного состояния.

Воспользуемся данными проф. Квиби, который производил опыты с котлом Велокса паропроизводительностью в 20 т/ч. На рис. 360 показан характер изменения основных замеров во время пуска котла. Нагрузка котла достигала расчетной паропроизводительности через 4 мин. 50 сек.

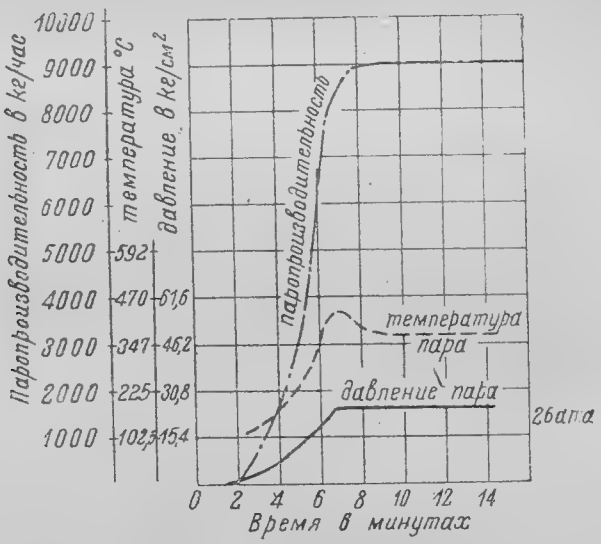


Рис. 360. Кривая пуска опытного котла Велокса в Бадене.

Таблица 133

Наименование	Обозначение	Размерность	Нагрузка			
			1/4	3/4	норм.	перегрузка
Топливо — нефть (теплотворная способность)	$Q^р_н$	*кал/кг*	10 000	9 920	9 920	10 000
Расход нефти в час	B	*кг/ч*	490	1 430	1 930	2 080
Коэфициент избытка воздуха	α	—	1,29	1,10	1,11	1,06
Температура газов, выходящих из экономайзера	$t_{ух}$	°Ц	69	109	125	123
Испарено воды в час	D	*кг/ч*	6 670	19 200	26 200	28 700
Давление пара за пароперегревателем	$P''_{пе}$	*ати*	19,5	20,0	19,8	20
Температура пара за пароперегревателем	$t''_{пе}$	°Ц	306	357	381	375
Температура питательной воды	$t'_к$	°Ц	60	60	62	62
Электрическая энергия. Мощность, расходуемая всеми вспомогательными механизмами	$N_{в.м}$	*квт*	48,4	73,6	157,6	174
К. п. д. котла (подсчитанный по $Q^р_н$) без вспомогательн. механизмов	$(\eta_{к.а})$	%	90,3	93,1	93,8	95,0
То же со вспомогательными механизмами	$(\eta_{к.а})$	%	86,8	91,2	90,8	92,1

Выявленные в процессе опытов и эксплоатации преимущества котлов Велокса побудили ряд конструкторов заняться разработкой котла Велокса для судовых установок.

Результаты испытания котла Велокса паропроизводительностью 25 *т* в час в Тулоне приведены в табл. 133.

В табл. 134 приводятся сравнительные данные котла Велокса с котлами Бабкока и Вилькокса и Ярроу. Данные этой таблицы, а также опыт постройки и эксплоатации котлов Велокса, позволяют сделать следующие выводы о преимуществах котлов Велокса, имеющих большое значение для судовых установок по сравнению с нормальными водотрубными котлами:

1) уменьшение веса в 3—4 раза;

2) уменьшение габаритных размеров в 2—3 раза;

3) уменьшение продолжительности разводки паров примерно в 6 раз;

4) увеличение к. п. д. котла до 90—92% против 78—85% у современных водотрубных котлов;

5) уменьшение тепловых потерь с котловой водой во время остановок котла.

Перечисленные здесь преимущества котлов Велокса были связаны с рядом недостатков. Главные из них:

1) увеличение вероятности остановки котла из-за повреждения отдельных его элементов. Повреждения возможны ввиду наличия в установке котла Велокса газовой турбины и циркуляционного насоса, перекачивающего воду при высоких давлениях и температурах;

2) увеличение мощности вспомогательных механизмов до 30% от мощности всей установки котла Велокса.

Котлы Велокса в настоящее время начинают применять и в судовых установках. В начале 1936 г. котел Велокса установлен на французском пароходе «Athos».

Основные характеристики котла сведены в табл. 135.

Данные этой таблицы указывают, что основные проектные характеристики судового котла Велокса удалось получить и на практике.

СУДОВЫЕ КОТЛЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В целях получения наибольших прибылей владельцы крупных пароходных компаний в конце 20-х гг. текущего столетия проводят усиленную рационализацию силовых установок.

Эта тенденция к рационализации производства блестяще охарактеризована в докладе т. Сталина на XVI партийном съезде:

«Чтобы выиграть в конкуренции и выжать побольше прибыли, капиталисты вынуждены развивать технику, проводить рационализацию, усилить эксплоатацию рабочих и поднять производственные возможности своих предприятий до крайних пределов» [1].

Капиталисты вводят все новейшие достижения котельной техники в силовые судовые установки. В частности, в судовых котельных установках начинают появляться котлы высокого давления. Внедрение пара высокого давления дает возможность повысить производительность и к. п. д. паросиловой установки.

Понятие «высокое давление пара» относительно. Оно связано с развитием науки и техники определенной эпохи. 150 лет тому назад высоким давлением пара считалось давление выше 0,3 *ати*, хотя

[1] XVI съезд Всесоюзной коммунистической партии (б). Стенографический отчет. Стр. 20, 1930.

Таблица 134

Наименование	Обозначение	Размерность				
Водоизмещение в *т*			40640		3350	
Скорость в узлах			26—25		20	
Мощность в *л. с.*			4×25 000=100 000		2×15 000=30 000	
Характер машинной установки			существующая установка	проект с генератором Велокс	существующая установка	проект с генератором Велокс
Тип котлов			Ярроу	Велокс	B и W	Велокс
Число котлов			10	8	6	4
Производительность одного котла	D	*т/ч*	30/40	55	25	15
Общее количество вырабатываемого пара:						
а) нормальная нагрузка	$D_{\text{нор}}$	*кг/ч*	312 000	—	142 000	—
б) наибольшая контрактная	$D_{\max}$	»	362 000	441 000	166 000	180 000
в) при небольшой форсировке	$D_{\text{недогр}}$	»	525 000	—	—	—
Давление пара	$P_{\text{к}}$	*ата*	31,5	32	28	29,9
Температура пара	$t_{\text{п}}$	°Ц	386	385	375	375
Температура воды	$t_{\text{в}}$	°Ц	190	100	190	100
Поверхность нагрева для одного котла:						
а) экономайзерная	$H_{\text{эк}}$	*м²*	—	247	—	200
б) генераторная	$H_{\text{ген}}$	»	1250	110	975	90
в) Суммарная поверхность нагрева	$\sum H_{\text{к}}$	*м²*	1250	357	975	290
перегревателя	$H_{\text{пе}}$	»	660	132	232	100
воздухоподогревателя	$H_{\text{в. п}}$	»	1550	—	762	—
полная поверхность нагрева	$\sum H$	»	3460	289	1969	390
Нагрузка по паросъему *кг/м²* на генератор П. Н. (суммарная П. Н., полная Н. П.)	$\frac{D}{H_{\text{г}}}$	*кг/м²ч*	25/25/9,01		24,3/24,3/12	
а) при нормальной нагрузке	$\frac{D}{\sum H_{\text{к}}}$	»	28/29/10,45	501/154/113	28,4/28,4/14,05	500/155/115
б) при максимальной контрактной						
в) при небольшой форсировке	$\frac{D}{\sum H}$	»	42/42/15,2	—	—	—
Коэфициенты полезного действия[2]						
а) при нормальной работе	η	%	87			
б) при максимальной контрактной	„	%	85	92	85[1]	92
в) при наибольшей форсировке	»	%	82			
Испарительность топлив	$И_{\text{в}}$	*кг/кг*	14,5	14,5	14,8	14,8
Вес сухого котла	$G_{\text{к}}$	*т*	228,5	72,5	154,5	61
Вес воды в котле	$G_{\text{в}}$	»	14,5	5,00	10,5	6
Процент от веса котла		%	6,35	6.8	6.8	9,84
Суммарный вес котла	$G_{\text{к+в}}$	*т*	243	77,5	165	67
Включая вентиляторы, газо- и воздуховоды (без труб, насосов и подогревателя)	$G_{\text{к. у}}$	*т*	2430	620	990	268
Экономия в весе котельной установки в проц. к имеющейся		%	—	74,5	—	73,0

Продолжение табл. 134.

Наименование	Обозначение	Размерность	Существующая установка Ярроу	Проект с генератором Велокса	Существующая установка B и W	Проект с генератором Велокса
Вес кот. установки, отнесенный к вырабатываемому пару:						
а) при нормальном режиме	$\frac{G_{к.\,у}}{D_{нор}}$	*кг/кг*	7,9	—	7,1	—
б) при максимальном контрактном	$\frac{G_{к.\,у}}{D_{max}}$	»	6,8	1,43	6,06	1,51
в) при наибольшей форсировке	$\frac{G_{к.\,у}}{D_{форс}}$	»	4,7	—	—	—
Удельный вес, отнесенный к мощности главных машин	$\frac{G_{г.\,мех}}{N_i}$	*кг/л. с.*	24,3	6,2	33,0	8,93
Удельный вес, отнесенный к поверхности нагрева	$\frac{G_{г.\,мех}}{\sum H_к}$	*кг/м²*	194	217	169	214
Суммарные габариты котельных отделений (длина×ширина×высота) в *м*	$V_{к.\,отд}$		47×20,6×10	20×26,6×9,03	20×21,2×8,14	9,0×24×7,93
Суммарный объем котельных отделений	$V_{к.\,отд}$	*м³*	9650	4670	3350	1720
Нагрузка на объем котельных отделений . .	$\frac{D}{V_{к.\,отд}}$	*кг/м³*	252	132,5	295	157
	$\frac{N_i}{V_{к.\,отд}}$	*кг/л. с.*	10,35	21,4	8,96	17,45
Площадь палубы в котельных отделениях . . .	$S_{к.\,отд}$	*м²*	866	532	424	216
Нагрузка на площадь палубы	$\frac{D}{S_{к.\,отд}}$	*кг/м²*	2810	1165	2340	1240
	$\frac{N_i}{S_{к.\,отд}}$	*л. с./м²*	115,5	188	70,8	139

[1] Расчетный (см. стр. 549).

[2] К. п. д. для водотрубных котлов учитывает только потери в котле. Потери в котле Велокса включают расходы на топливный насос в вентиляторе и циркуляционный насос (см. стр. 549).

Папин в 1680 г. достигал в своем котле для разваривания костей давления порядка 80—100 *ати*, а в начале 1800 гг. Эванс получал в котле для паровых машин пар давлением в 8—10 *ати*. Но такие случаи получения пара высокого давления в котлах в то время были единичны.

Еще в 1870 гг. в судовых установках нормальным рабочим давлением в котле считалось 2—3 *ати*. Давление же пара в 5 *ати* называлось высоким и на судах редко применялось.

В эпоху империализма возрастают требования к быстроходности судов, к уменьшению веса и габаритных размеров котельных и машинных установок. Это заставляет котлостроительные заводы и научно-исследовательские институты усилить работу по постройке и эксплоатации судовых установок высокого давления. Уже перед империалистической войной 1914—1918 гг. нормальное давление в судовых котлах поднялось до 15—18 *ати*. К началу 20-х гг. в судовых установках имелось немало котлов, работающих при давлении пара в 20—25 *ати*.

Таблица 135

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Год постройки котла Велокса для парохода „Athos“			1936
2	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	50
3	Температура перегретого пара .	$t_{пе}$	°Ц	450
4	Число котлов			1
5	Паропроизводительность котла .	D	*т/ч*	35
6	Поверхность нагрева котла . . .	H	$м^2$	76
7	Суммарная поверхность нагрева	$\sum H$	„	289
8	Тепловое напряжение топки . .	$\frac{Q}{V}$	млн. $кал/м^3ч$	4,2
9	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	$кг/м^2ч$	460
10	Паронапряжение суммарной пов. нагр. котла	$\frac{D}{\sum H}$	„	120
11	Вес котельной установки на 1 *т* производимого пара, включая газовую турбину, циркуляционный насос, турбовоздуходувку и систему регулирования	$\frac{D}{G_{к.у}}$	*т/т*	1,4

Дальнейший рост повышения давления пара в котлах тормозился утяжелением котлов, главным образом, за счет веса коллекторов.

В котлостроении появилась тенденция к максимальному сокращению коллекторов. Начали разрабатывать котлы с двумя коллекторами вместо трех у котлов треугольного типа. Большое распространение, особенно в Америке, начали получать одноколлекторные котлы.

220. Котлы Бенсона

Естественным следствием тенденции понижения веса котлов высокого давления за счет уменьшения числа коллекторов явилась мысль о совершенном отказе от применения котельных коллекторов. Одним из представителей бесколлекторных котлов высокого давления является прямоточный котел Бенсона (см. § 11, 81 и 83).

Идея устройства прямоточных котлов была дана еще в конце XVIII в. (котлы Блекея и Фитча). Затем в течение почти всего XIX в. неоднократно делались попытки применять прямоточные котлы в судовых установках (котлы Бельвиля 1850 г., Геррешофа 1878 г. и др.). Эти попытки не получили успеха, так как применяемые тогда методы сжигания топлива не позволяли в каждый данный момент дозировать выделение в топке тепла в соответствии с потребной паропроизводительностью. Основное зло заключалось в малой аккумулирующей способности прямоточного котла, ввиду наличия в нем небольшого количества воды. Если, например, количество выделяемого в топке тепла было значительно больше того, которое необходимо для испарения воды, вводимой в каждый данный момент в трубки котла, то пар получался сильно перегретым. Наоборот, если в топке тепла выделялось меньше, чем нужно для испарения воды, введенной в трубки котла, то пар получался влажным. Оба случая несли большой вред для работы машин, вплоть до их поломки.

При сильно перегретом паре возможно было сгорание смазочного материала и набивки, применяемых в машинах, а при влажном паре в паропроводах и машинах могли произойти гидравлические удары.

Применение прямоточных котлов начало получать успех лишь с 20-х гг. XX в. К этому времени удалось полностью устранить те препятствия, которые мешали надежной работе котла. Освоение камерного способа сжигания нефти и пылесжигания сделало возможным точнейшее регулирование количества сжигаемого в данный момент топлива в соответствии с потребным расходом пара.

Разрешение этого основного требования в эксплоатации прямоточных котлов было облегчено полученными к началу 20-х гг. XX в. колоссальнейшими достижениями техники в области механизации и автоматизации управления работой механизмов паросиловых установок.

Первыми прямоточными котлами, получившими успех в эксплоатации, являются котлы Бенсона. По своему устройству котел Бенсона [1] напоминает уже давно известные прямоточные котлы. В котле Бенсона так же, как и в прямоточных котлах, в один конец трубы входит вода, а из другого конца ее выходит пар (рис. 361).

Характерной особенностью котлов Бенсона является подогрев и испарение воды при критическом давлении (т. е. когда не существует разницы между водой, нагретой до температуры, близкой к 374° Ц, и паром). При критическом давлении в 224,2 *ати* удельный объем воды и пара одинаковы, а скрытая теплота испарения равна нулю. В котлах, работающих на давлении ниже критического, испарение воды сопровождается образованием на поверхности нагрева пузырьков пара значительно большего удельного объема, чем вода. Пузырьки пара могут приставать к поверхности нагрева и этим вызывают ухудшение коэфициента теплопередачи, а также местный перегрев металла. Застой паровых пузырьков в кипятильных трубках,

[1] Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 77—109, 1932.

дающих весьма большой съем пара, может привести даже к пережогу их стенок, что часто влечет за собой остановку работы котла. Данной опасности в котлах Бенсона не существует, так как производство пара по способу Бенсона не сопровождается образованием паровых пузырьков. Вследствие этого в котлах Бенсона отпадает необходимость сепарации пузырьков пара от воды, и сепарирующие паровые коллекторы становятся ненужными.

Парообразование по способу Бенсона схематически может быть представлено так. Вода нагнетается в трубный змеевик под давлением несколько выше критического (224,2 *ати*). В змеевике за счет теплоты газов вода нагревается до 374° Ц и без всякого вскипания превращается в пар. Полученный пар продолжают перегревать при-

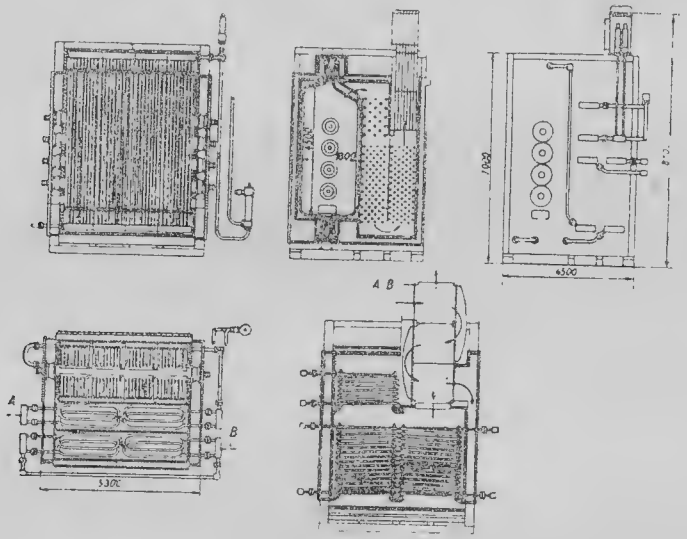


Рис. 361. Котел Бенсона.

мерно до 400° Ц. Затем пар дросселируется до рабочего давления в паровом двигателе. Непосредственное использование пара давлением 225 *ати* и температурой 400° Ц невыгодно, так как пар при критическом давлении теряет свой перегрев. Однако, если пар при давлении в 225 *ати* перегреть до 500° Ц, то тогда его применение в паровых двигателях становится выгодным. В настоящее время в США уже применяется пар, перегреваемый до 540° Ц. Непосредственное использование пара критического давления стало возможным в наши дни.

После дросселирования пар рабочего давления направляется и пароперегреватель, где он перегревается примерно до температуры в 450° Ц. Из перегревателя пар поступает в паровой двигатель.

Изучение этого способа парообразования началось в 1922 г. в Англии. В 1924 г. в Регби был построен и пущен в работу котел Бенсона производительностью в 4,5 *т/ч*. После этого для изучения и эксплоатации были установлены следующие котлы Бенсона (табл. 136).

Перейдем к рассмотрению судового котла Бенсона, построенного для парохода «Уккермарк». При постройке первого судового котла Бенсона был использован богатый опыт постройки и эксплоатации котлов Бенсона для завода Сименс-Шуккерт. Котел Бенсона (рис. 361)

Таблица 136

Год постройки	Тип установки	Мощность паропр. *т/ч*	Место постройки, страна или город
1924	Опытный	10,0	Электростанция Об-ва Сименс-Шуккерт в Берлине
1927	Эксплоат.	35	Теплоцентраль кабельного завода Сименс-Шуккерта
1927	Опытный	3	Высшее техническое училище в Шарлоттенбурге
1927	„	7,5	Фабрика треста Н. Г. Фарбениндустри в Биттерфильде
1928	Эксплоат.	45	Кабельный завод Сименс-Шуккерта
1930	„	100	Станция Лангербрюге (Бельгия)
1930	„	—	Пароход „Уккермарк“ компании Гамбург-Америка

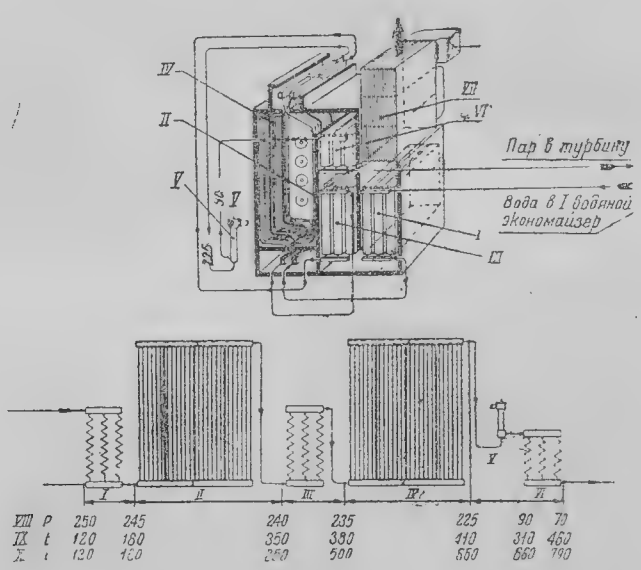


Рис. 362—363. Схема движения воды и газов в котле Бенсона.

I — I — водяной экономайзер; *II — I* — экран; *III — II* — водяной экономайзер; *IV — II* экран; *V* — редукционный клапан; *VI* — пароперегреватель; *VII* — воздухоперегреватель; *VIII* — давление в атм. *P*; *IX* — температура в °Ц *t*; *X* — теплосодержание в $\frac{кал}{кг}$.

не имеет коллекторов и водяных уровней. Он состоит только из трубок и соединительных коробок.

Работу котла схематически можно представить так. Питательная вода, подогретая до 120° Ц, нагнетается насосом в змеевиковый экономайзер, расположенный под воздушным подогревателем. Здесь

вода подогревается до 180° Ц и, как показано на рис. 362 стрелками, поступает в экранные трубки, расположенные перед внутренней топочной стенкой. В экране вода нагревается до 350° Ц и переходит через верхние соединительные коробки во второй экономайзер, расположенный под перегревателем пара. В конце второго экономайзера вода превращается в пар, который при температуре в 380° Ц входит через нижние соединительные коробки во второй экран, установленный перед наружной стенкой топки. В экране пар перегревается до 410° Ц и направляется к редукционному клапану, где понижает свое давление до 90 *ати*. Одновременно с уменьшением давления в клапане снижается и температура пара до 310° Ц. Пройдя редукционный клапан, пар поступает в расположенный над испарителем перегреватель, где он перегревается до 460° Ц, и переходит в турбины. Из-за наличия сопротивлений в перегревателе и паропроводе давление пара перед турбиной понижается до 60 *ати*.

На рис. 363 показана схема работы котла Бенсона, и указаны давление, температура и теплосодержание жидкости, замеренные в различных точках змеевика котла.

Наглядное представление о процессе парообразования в котле Бенсона может дать диаграмма, приведенная на рис. 364. Кривая *3* (*IT*) показывает, что температура нагрева воды идет сначала почти по прямой линии, затем при 370° Ц наступает своеобразная критическая зона, при которой, несмотря на почти постоянную температуру, теплосодержание жидкости круто повышается. В этой зоне происходят молекулярные превращения и значительное увеличение объема (см. кривую *KP*(*VT*)).

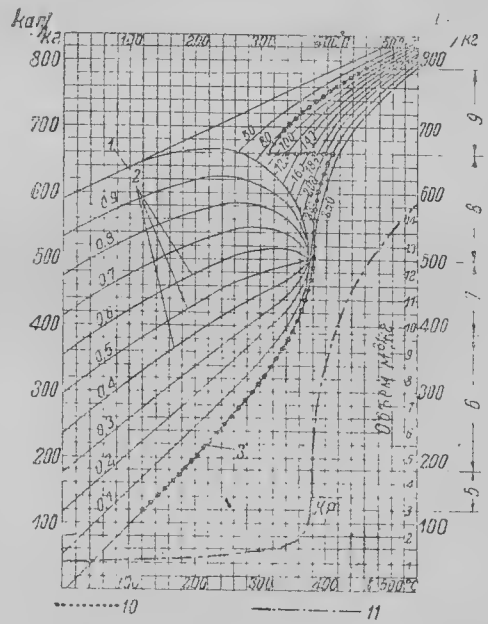


Рис. 364. Процесс парообразования в котле Бенсона по *I* τ диаграмме.

1 — насыщенный пар; *2* — кривые паросодержания в паровой смеси; *3* — вода; *5* — *I* — экономайзер; *6* — *I* экран; *7* — *II* — экономайзер; *8* — *II* — экран; *9* — перегреватель; *10* — изменение температуры воды и пара; *11* — изменение объема воды и пара.

Падение температуры и давления пара при дросселировании показано на диаграмме *IT* горизонтальной кривой, из которой ясно видно, что при дросселировании не происходит понижения теплосодержания пара.

Котел Бенсона был установлен на пароходе «Уккермарк» вместо двойного цилиндрического котла. Паропроизводительность котла Бенсона была достаточной для развития полной мощности силовой установки. На случай возможных перебоев в работе с котлом Бенсона во время его пускового периода на пароходе «Уккермарк» были оставлены два шотландских котла и один двойной цилиндрический котел, работающие при давлении в 15 *ати*. Эти три котла могли снабжать турбинную установку паром в количестве, необходимом для развития полной мощности турбин. Таким образом пароход «Ук-

кермарк» имел 100%-ный резерв мощности котлов, что было сделано для обеспечения бесперебойных рейсов судна.

Рассматриваемый котел (рис. 361) отапливался нефтью. Для этой цели с двух боковых сторон было установлено по четыре форсунки с часовой производительностью по 180—200 *кг* нефти при давлении в 15,0 *ати*. Топочные газы уходили из камеры сгорания в перегреватель. Из перегревателя газы поступали во второй экономайзер, пройдя который они поворачивали на 180° и вступали в первый экономайзер. Из последнего через пластинчатый воздушный подогреватель газы уходили в дымовую трубу при температуре, равной примерно 200° Ц.

Экранные трубки имели наружный диаметр 20 *мм*, а оба экономайзера и перегреватель имели трубки диаметром 25 *мм*. Трубки котла выполнялись из стали, которая для большей прочности и огнестойкости облагораживалась присадками молибдена, меди, марганца и кремния. Такой материал хорошо поддавался сварке. В котле Бенсона все трубки сваривались из отдельных кусков. В соединительных коробках трубки держались также на сварке. Исследование вырезанных образцов трубок после одного года их работы показало, что трубки не имели разъеданий и изменений структуры металлов.

Все части котла Бенсона крепились в солидном каркасе. Последний состоял из двутавровых балок, швеллеров и угольников, соединенных стальными листами. Листы защищались шамотным кирпичом, который покрывался снаружи изолировочными матами из стеклянного волокна.

Суммарная поверхность нагрева котла Бенсона составляла 515 $м^2$. Из них поверхность экрана равнялась 125 $м^2$, обоих экономайзеров (2×158 $м^2$) и пароперегревателя 74 $м^2$. Часовая паропроизводительность котла Бенсона составляла 19 500 *кг*. Часовой съем пара с 1 $м^2$ суммарной поверхности нагрева котла составлял 39 *кг*, что является небольшой величиной, если принять во внимание значительную экранированную поверхность в сравнении с общей поверхностью котла.

Тепловые напряжения экранированных поверхностей нагрева $\frac{Q}{H_{эк}}$ составляли приблизительно 200 000 $кал/м^2ч$, а тепловое напряжение топки было равно 440 000 $кал/м^3ч$.

Воздух, необходимый для горения, нагнетался в топку вентилятором через пластинчатые воздухоподогреватели и воздухонаправляющие форсуночные устройства. В подогревателе воздух нагревался примерно до 240° Ц. Тяга в котле усиливалась дымососом (вытяжной вентилятор). Вес котла Бенсона с водой составлял приблизительно 100 *т* против 160 *т* веса прежнего двойного цилиндрического котла, на место которого он был поставлен. Общий вес котла распределялся следующим образом: 1/3 приходилась на трубки, вторая треть на каркас и остаток на нефтяные баки, арматуру, изоляцию и кладку. В более поздних конструкциях котла вес отдельных частей его удалось значительно понизить без ущерба для прочности котлов.

Питательная вода в котел Бенсона подавалась поршневым насосом Бальке с тремя двойными плунжерами. Насос приводился в движение электрическим мотором. Регулирование количества питательной воды, подаваемой в котельную, могло производиться, с одной стороны, изменением числа оборотов насоса с 95 до 115 об/мин., и, с другой стороны, отключением всасывающего пространства у каждого из шести плунжеров.

При постройке и эксплоатации котла Бенсона чрезвычайно большое внимание было уделено очистке питательной воды. В котлах высокого давления накипеобразования в трубках являются весьма опасными для прочности их стенок. Для уменьшения вероятности перегорания трубок добивались, чтобы количество посторонних примесей не превышало 1 *мг* на 1 *л* воды. Возможность поддержания такого небольшого количества посторонних примесей в питательной воде облегчалась устройством безукоризненно плотного конденсатора, который состоял из медно-никелевых трубок.

Чтобы иметь возможность производить питание котлов водой с повышенной соленостью (до 100 *мг* на 1 *л*), котлостроительные заводы разрабатывают новые котлы Бенсона, у которых кипятильные трубки в зоне превращения воды в пар будут нагреваться газами

Таблица 137

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Характеристики котла Бенсона, установленного на пароходах:	
				„Уккермарк"	„Потсдам"
1	Год постройки . . .			1930	1934
2	Мощность механизмов	$N_э$	*л. с.*	6000	26000
3	Давление в котле . .	$P_к$	*ати*	250	90
4	Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	260	470
5	Число котлов	—	—	1	4
6	Паропроизводительность одного котла . .	D	*т/ч*	20	24—28
7	Поверхность нагрева котла	H	$м^2$	44	340
8	Поверхность нагрева котла, перегревателя и водяного экономайзера	$\sum H$	$м^2$	515	590
9	Диаметр кипятильных трубок	d	*мм*	20	25—33, 25—28
10	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	млн. *кал/м³ч*	0,44	1—1,2
11	Паронапряжение поверхности нагрева котла	$\frac{D}{H_к}$	*кг/м²*	45	70—82
12	Паронапряжение всей поверхности нагрева .	$\frac{D}{\sum H}$	„	38	41—47
13	Вес котла с водой, готового к эксплоатации, включая обмуровку, кожух, но без воздухоподогревателя, на 1 *т* производимого пара . . .	$\frac{G_{к.у}}{D}$	*т/т*	5	2,1—1,8

Таблица 138

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Котлы водотрубные		Котлы Бенсона	
1	Теплотворная способность топлива	$Q^p_н$	*кал/кг*	10000	10000	10000	10000
2	К. п. д. котла	$\eta_к$	%	88	88	90	90
3	Давление в котле . .	$P_к$	*ата*	16	32	225	225
4	Температура пара за перегревателем	$t''_п$	°Ц	350	375	440	460
5	Давление пара перед турбиной	$P'_к$	*ати*	15	30	60	120
6	Температура питательной воды	$t'_к$	°Ц	40	40	40	40
7	Температура пара перед турбиной	$(t_п)'_т$	°Ц	325	350	420	440
8	Теплосодержание пара	$i_п$	*кал/кг*	739	745	772	777
9	Сообщено тепла 1 *кг* воды в котле	$\Delta i_к$	„	699	705	752	739
10	Теплоперепад 1 *кг* пара в турбине	$\Delta i_т$	*кал/кг*	325	249	285	310
11	Расход пара на 1 *э.с.ч*	$\frac{D}{N_э}$	*кг/э. л. с. ч*	3,74	3,38	2,96	2,71
12	Расход топлива на 1 *э.л.с.ч.*	$\frac{B}{N_э}$	*г/э. л.с. ч*	297	271	240	222
13	Термический к. п. д. установки	$\eta_т$	%	21,2	23,3	26,3	28,4
14	Экономия топлива . .		%	0	9	19	25

температурой 700° Ц, а не 1500° Ц, как у ранее рассмотренных котлов Бенсона.

Чтобы не допустить нарастания толстого слоя накипи, во время стоянки парохода в гавани производили промывку котла. Одно и то же количество подогретой воды прокачивалось по системе труб до тех пор, пока ее соленость не переставала возрастать. Эксплоатационные наблюдения над работой котла Бенсона на пароходе «Уккермарк» показали, что котел был всегда готов к изменениям нагрузки. Довольно большое количество тепла, заключенное в стальном материале и обмуровке, несмотря на ничтожное количество воды, находящейся в котле, было достаточно для того, чтобы выравнивать колебания потребления пара турбинами. Растопка котла Бенсона на пароходе «Уккермарк» продолжалась 1 час.

10 сентября 1930 г. на пароходе «Уккермарк» был сделан первый пробный рейс с новым котлом. Эксплоатация котла Бенсона дала вполне удовлетворительные результаты.

В 1934 г. котел Бенсона был установлен на германском пароходе «Потсдам». В табл. 137 приведены для сравнения основные характеристики котлов Бенсона, установленных на германских пароходах «Потсдам» и «Уккермарк».

Данные табл. 137 показывают на большие достижения в постройке судовых котлов Бенсона. Паронапряжение поверхности нагрева удалось повысить с 38 *кг/м²ч* до 47 *кг/м²ч*. Одновременно вес котельной установки уменьшили примерно в 2,5 раза.

Для сравнения габаритных размеров котла Бенсона с размерами современных водотрубных котлов одинаковой мощности приводим рис. 365, из которого видны явные преимущества котла Бенсона

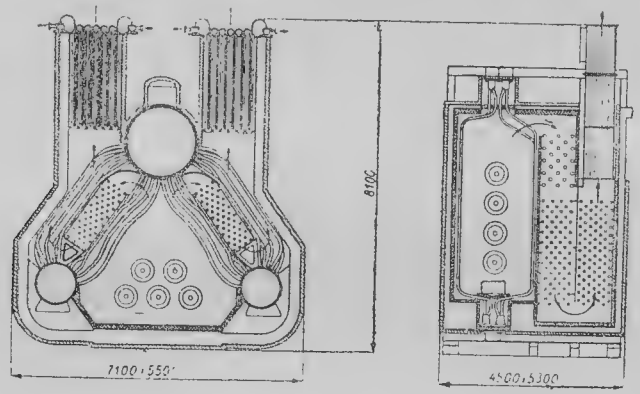


Рис. 365. Габаритные размеры котла Бенсона и нормального водотрубного.

в этом отношении. К другим преимуществам котла следует отнести:

1) полное отсутствие коллекторов,

2) высокие коэфициенты теплопередачи из-за перпендикулярного потока газов по отношению к трубкам,

Таблица 139

Наименование	Обозначение	Размерность	Характеристика работы паросиловой установки с вспомогательными машинами			
Расход пара на силу . . .	$\frac{D}{N_э}$	*кг/э. л. с. ч*	4,19	3,78	3,27	2,98
Температура питательной воды	$t'_к$	°Ц	120	120	120	120
Сообщено тепла 1 *кг* воды в котле	$\Delta i_к$	*кал/кг*	619	625	652	657
Расход топлива на силу . .	$\frac{B}{N_э}$	*г/э. л. с. ч*	295	269	236	218
Экономия		%	0	9	20	26
Термический к. п. д. установки	$\eta_т$	%	21,4	23,5	26,8	29

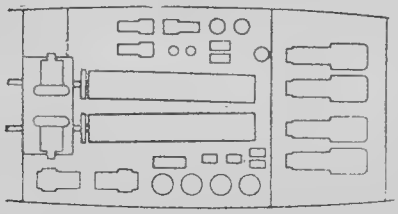
3) высокую степень экранирования топки.

Для наглядности представления о выгодности применения пара высокого давления приводим табл. 138—139, в которых даны основные характеристики работы котлов при разных давлениях и температурах пара.

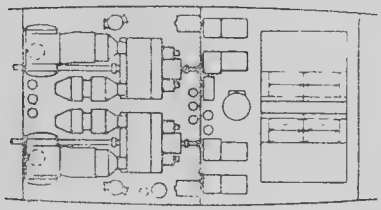
При сравнении приняты одинаковыми:

Теплотворная способность нефти $Q_н^р = 10\,000$ *кал/кг*
Вакуум в конденсаторе 94%
К. п. д. турбины 75%
Температура питательной воды . . . . 40° Ц

Экономия расхода нефти в 20—26% дает широкие перспективы в деле применения на судах установок высокого давления, которые могут успешно конкурировать с судовыми дизель-моторами как по весу, так и по габаритным размерам, уступая последним лишь в отношении расхода топлива. На рис. 366 сравниваются дизельная



Дизельная установка мощностью 15 000 *э. л. с.*
Расход нефти на 1 *э. л. с. ч* 0,176 *кг*.
Суммарный вес установки 820 *т* или 55 *кг/э. л. с.*
Занимаемая площадь 340 *м²* или 0,023 *м²/э. л. с.*



Установка с котлами Бенсона
Мощность турбин 15000 *э. л. с.*
Давление пара 100 *ати*.
Температура пара 480 °Ц.
Расход мазута на 1 *э. л. с. ч.* 0,232.
Суммарный вес установки 790 *т* или 53 *кг/э. л. с.*
Занимаемая площадь 310 *м²* или 0,021 *м²/э. л. с.*

Рис. 366. Сравнение дизельной установки с установкой с котлом Бенсона.

установка мощностью в 15 000 *л. с.* с бенсоновской установкой такой же мощности.

Расход нефти у дизельмоторов на 24% меньше, но зато их вес на 30% выше. Площадь, занимаемая установкой, включая и нефтяные баки у дизельмоторов, на 30 *м²* больше, чем в бенсоновской установке.

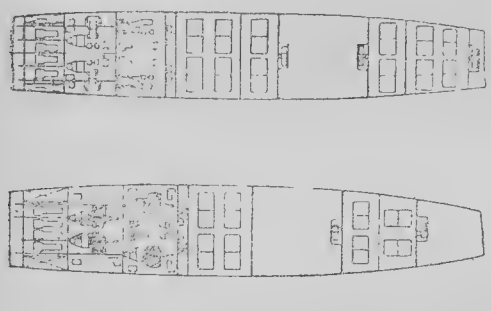
Не меньший интерес может представить сравнение бенсоновской установки с установкой из водотрубных котлов. На рис. 367 показаны проекты установки с водотрубными котлами мощностью в 120 000 *л. с.* и установки Бенсона мощностью в 180 000 *л. с.* Несмотря на то, что мощность бенсоновской установки на 50% больше, ее вес был бы на 1300 *т* меньше, а площадь основания могла бы быть уменьшена примерно на 500 *м²*. Помимо всего этого, расход нефти на 1 *л. с. ч* был на 28% меньше. И оба корабля вышли бы в океанский рейс с одинаковым запасом топлива. По этому проекту бенсоновская установка состоит из 8 котлов паропроизводительностью в 45 и 35 *т/ч*.

Котел Бенсона, спроектированный для 45 *т* пара в час, изображен на рис. 368. По своей конструкции он напоминает котел Бенсона на пароходе «Уккермарк», который хорошо зарекомендовал себя на практике. Его поверхность нагрева равна 1160 *м²*. Расчетный к. п. д.

этого котла равен 88%. При повышении нагрузки котла до 55 *т* пара в 1 час к. п. д. снижался лишь до 85%.

Основные характеристики сравниваемых здесь котлов приведены в табл. 140.

Таким образом, котел Бенсона имеет весьма большие преимущества по сравнению с нормальными силовыми установками.



I. Котельная установка с водотрубными котлами.
Мощность турбин 120 000 *э. л. с.*
Давление пара 22 *ати.*
Температура пара 370 °Ц.
Расход мазута 0,305 *кг/э. л. с. ч.*
Суммарный вес установки 8200 *т* или 68 *кг./э. л. с.*
Занимаемая площадь 3500 *м²* или 0,029 *м² э./л. с.*

II. Установка с котлами Бенсона.
Мощность турбин 180 000 *э. л. с.*
Давление пара 150 *ати.*
Температура пара 460°Ц.
Расход мазута 0, 20 *кг. э. л. с. ч.*
Суммарный вес установки 6900 *т* или 38 *кг/э. л. с.*
Занимаемая площадь 3000 *м²* или 0,017 *м²/э. л. с.*

Рис. 367. Сравнение котла Бенсона с водотрубным.

К недостаткам котла Бенсона следует отнести необходимость питания котлов весьма чистой водой, что в судовых условиях не всегда выполнимо. Этот недостаток оказал решающее влияние на слабое распространение котлов Бенсона в судовых установках. В последнее время для расширения применения своих котлов Бенсон пошел на снижение давления с 225 *ати* примерно до 100 *ати*. Умень-

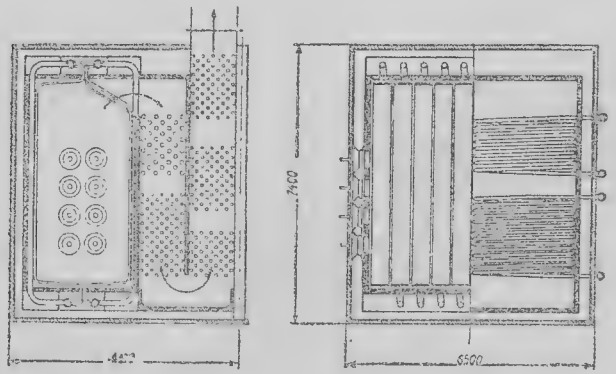


Рис. 368. Котел Бенсона производительностью в 45 *т*.

шением давления с критического до 100 *ати* Бенсон, по существу, отказался от главной отличительной особенности своих котлов (отсутствие скрытой теплоты парообразования).

Понижение давления позволило значительно уменьшить вес и температурные напряжения в трубках.

Многие изобретатели и конструкторы стремились разработать конструкции котла высокого давления, менее чувствительного к качеству питательной воды. Наибольший успех в этой работе получили Леффлер, Шмидт и Гартман.

Таблица 140[1]

Наименование	Обозначение	Размерность	Тип судовых установок									
			дизель	турбина и котел Бенсона	дизель	турбина и котел Бенсона	дизель	турбина и котел Бенсона	турбина и водотрубн. котел	турбина и котел Бенсона	турбина и водотрубн. котел	турбина и котел Бенсона
Мощность установки	$N_э$	*л. с.*	9500	9500	15 000	15 000	25 000	25 000	28 000	28 000	120 000	180 000
Давление пара перед турбиной .	$P'_т$	*ата*	—	100	—	100	—	100	28	100	22	150
Температура пара перед турбиной	$t'_т$	°Ц	—	450	—	450	—	450	350	450	370	460
Общий вес установки	$G_у$	*т*	880	710	820	790	2350	1750	2700	1900	8200	6900
Общий вес на 1 *э. л. с.*	$\frac{G_у}{N_э}$	*кг/э. л. с.*	93	75	55	53	95	70	96	68	68	38
Площадь, занимаемая установкой	$F_у$	$м^2$	320	250	340	310	700	570	780	600	3000	3500
Площадь, занимаемая установкой на силу	$\frac{F_у}{N_э}$	$м^2$/*э. л. с.*	0,034	0,026	0,023	0,021	0,028	0,023	0,028	0,021	0,029	0,017
Расход топлива на 1 *э. л. с.* . . .	$\frac{B}{N_э}$	*кг/э. л. с.*	0,176	0,238	0,176	0,232	0,172	0,226	0,280	0,226	0,305	0,220
Термический к. п. д. установки .	$\eta_т$	%	35,9	26,5	35,9	27,2	36,8	28	22,6	28,0	20,7	28,7
Расход нефти, выраженный в стоимости мазута, при условии, что нефть в 1,5 раза дороже мазута . .	$\frac{B}{N_э}$	*кг/э. л. с.*	0,264	—	0,264	—	0,258	—	—	—	—	—

[1] Таблицы 138, 139, 140 составлены по материалам статьи в журнале Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft, Hermann F. Die Verwendung von Höchstdruck Kesseln in Schiffsbetrieb mit besonderer Berücksichtigung des Benson Kessels. Стр. 77—94, 1932.

221. Котлы Леффлера

На рис. 369 показана схема работы котла Леффлера [1]. Вода, поступающая в котел, предварительно нагревается примерно до 100° Ц и, благодаря этому, освобождается от растворенного в ней воздуха. Затем насосом вода нагнетается в змеевиковый экономайзер, где она повышает свою температуру от 100° Ц до примерно 295° Ц. Из водяного экономайзера вода следует в испаритель *A*, расположенный вне обмуровки котла. В этот же испаритель поступает перегретый до 500° Ц пар под давлением в 130 *ати*. Проходя через толщу воды в испарителе, пар за счет теплоты перегрева превращает воду в насыщенный пар. Последний отсасывается из испарителя специальным насосом *B* и протоняется через пароперегреватель, где он перегревается до 500° Ц.

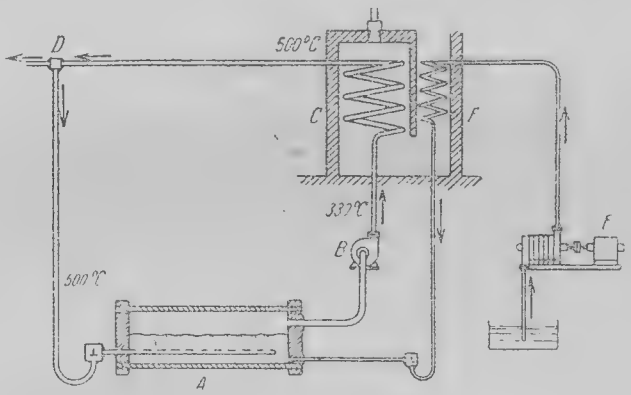


Рис. 369. Схема работы котла Леффлера.

Из пароперегревателя примерно 1/3 пара поступает к потребителю, например к турбинам, а примерно 2/3 пара опять направляются в испаритель *A*, и цикл генерации пара вновь повторяется.

Особенностью котла системы Леффлера является парообразование в коллекторе, не подвергаемом действию горячих газов. Испарение воды происходит не за счет теплоты газов, а за счет теплоты перегретого пара, который предварительно перегревается теплотой газов.

Благодаря такому способу парообразования, основная масса накипеобразователей будет осаждаться в испарителе *A*, и лишь небольшая часть накипеобразователей может уноситься паром из испарителя *A* в перегреватель. Осадки накипей в испарителе не приносят вреда, наоборот, их отложение является даже желательным, так как внутренний слой накипи, являющийся хорошим изолятором, уменьшает потери тепла испарителем в окружающую среду.

Первый опытный котел системы Леффлера был построен в 1923 г. и установлен на венском локомобильном заводе. На основе данных, полученных при испытании этого котла, был построен в 1924—25 г. второй котел Леффлера с часовой паропроизводительностью 8 *т* пара давлением 110 *ати* и температурой 480° Ц.

---

[1] Леффлер С. (Шарлоттенбург, Германия) запатентовал свой котел в Германии I/X 1924 г. DRP, № 500. WRH. Стр. 327—330. 1931. Der Löffler-Kessel als Schiffskessel. Schiffbau, S. 370—375, 1932.

В 1925 г. был построен третий стационарный котел Леффлера для производства 12—15 *т* пара в 1 час под давлением 120 *ати* и с температурой 500° Ц. Позднее были построены еще два котла с часовой паропроизводительностью в 40 *т*.

На рис. 370 приведена схема последнего котла и диаграмма основных его характеристик. Линия *D* показывает температуру пара; R_i — температуру стенок трубок с внутренней стороны и R_a — температуру их же с наружной стороны; *B кал/м²ч* — тепловое напряжение поверхности нагрева. Как видно из рис. 370, температуры стенок экранных труб, расположенных на фронтовой стенке, равняются на внутренней стороне примерно 450° Ц, а наружной —520° Ц. Температура экранных трубок, расположенных с обратной стороны топки, составляет 565° Ц. Тепловое напряжение поверхности нагрева на обеих сторонах $\frac{Q}{H_л}$ достигает 200 000 *кал/м²ч*. В конвекционном пере-

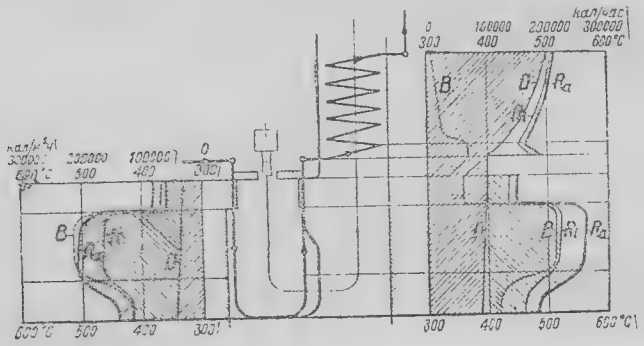


Рис. 370. Распределение температур и теплового напряжения в пучке труб.

гревателе температура стенки уже значительно понижается. Гидравлические сопротивления всей системы труб перегревателя в этом котле получались равными лишь 3,5 *ати*.

В последнее время начали разрабатывать проекты котлов Леффлера для установки их на судах.

Чтобы дать представление о преимуществах, которые могут получиться при замене на судах котлов цилиндрического и треугольного типа котлами Леффлера, мы приведем ниже несколько диаграмм.

Для котлов треугольного типа и цилиндрических характеристики взяты по эксплоатационным данным, а для котлов Леффлера — по расчетным данным и по данным испытания стационарных котлов Леффлера.

Для примера рассмотрим судно в 10 *т* водоизмещения. Для данного случая колебания веса котельной установки и расхода мазута на 1 *и. л. с. ч* показаны на диаграмме (рис. 371). Средний вес котельной установки Леффлера получается равным 10 *кг/и. л. с. ч* против 20 у котлов треугольного типа и 75 у цилиндрических котлов.

Расход мазута на 1 *л. с. ч* у котлов Леффлера составил бы 0,25 *кг* против 0,35 у котлов треугольного типа и 0,45 у цилиндрических котлов.

При увеличении мощности котлов Леффлера их вес можно понизить с 10 *кг/и. л. с. ч* до 6 *кг/и. л. с. ч* при $\eta = 75\%$ (рис. 372).

Все это позволяет при одинаковом весе котлов и одинаковом запасе мазута увеличить радиус действия судов с установками Леффлера в сравнении с судами, оборудованными цилиндрическими котлами, на 66% (рис. 372 a, b). Наоборот, при одинаковом радиусе действия можно было бы увеличить полезную грузоподъемность на 660 *т*.

На рис. 373 и 373а показан проект судового котла Леффлера для коммерческого парохода мощностью 5000 *л. с.* Котел должен производить 7 *т* пара в час давлением 130 *ати*. Для обеспечения полной мощности на пароходе надо установить три таких котла.

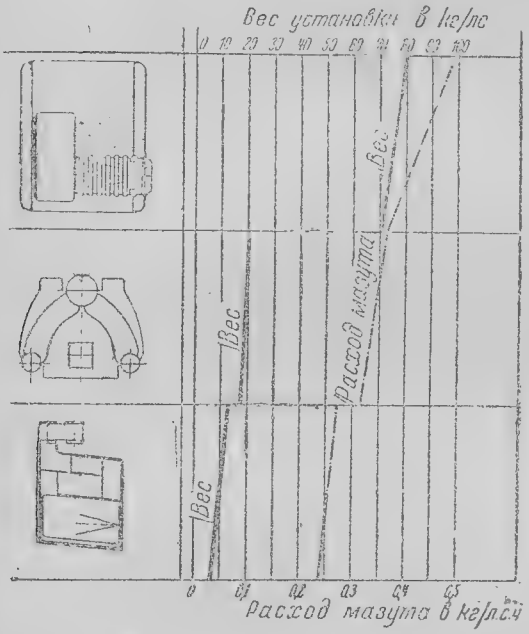


Рис. 371. Вес котла Леффлера в сравнении с весом других котлов.

Тепловое напряжение топки в проекте принято равным 500 000 *кал/м³ч*. Диаметр трубок радиационного перегревателя взят равным 38/29,5 *мм*.

Схему работы котла коротко можно изложить так. Пар из испарителя засасывается насосом и прогоняется

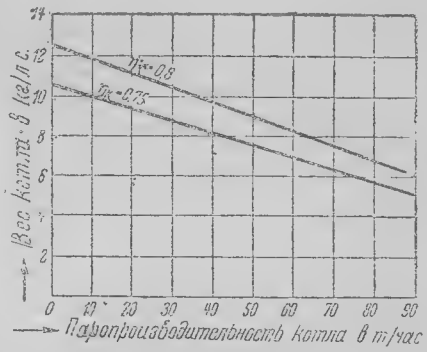


Рис. 372. Вес котла Леффлера в зависимости от производительности и к. п. д.

сначала через радиационный перегреватель, потом через конвекционный (трубки конвекционного перегревателя имеют диаметр 30/23 *мм*). Из конвекционного перегревателя часть пара идет к турбине, часть снова в испаритель.

За перегревателем расположен водяной экономайзер, состоящий из двух пучков труб, помещенных друг над другом. В экономайзере вода подогревается с 100 до 280° Ц. Над котлом помещен вращающийся воздушный подогреватель типа Юнгстрема. Последний подогревает воздух, поступающий в топку, до 200° Ц. Температура уходящих газов в этом котле запроектирована равной 200° Ц, а к. п. д. котла равен 82%.

Перед пуском котла Леффлера необходимо производить обогревание труб перегревателя паром от вспомогательных паровых котлов нормального давления. С наружной стороны трубки пароперегревателя должны обогреваться дымовыми газами, направляемыми в топку по особому газоходу из топки вспомогательного котла. Одновременно работает циркуляционный насос. Спустя $^1/_2$ часа трубки нагреваются до температуры насыщения пара, вводимого в испари-

I тип котлов

Пароходы водоизмещением в 10000 *m* каждый при одинаковом весе котлов и запасе топлива имеют нижеследующие радиусы действия, выраженные в процентах.

II тип котлов

Пароходы водоизмещением в 10000 *m* каждый при одинаковом радиусе действия могут увеличить свою полезную грузоподъемность на нижеследующее количество *m*.

Рис. 372 a, b. Радиус действия судов с котлами Леффлера в сравнении с другими котлами.

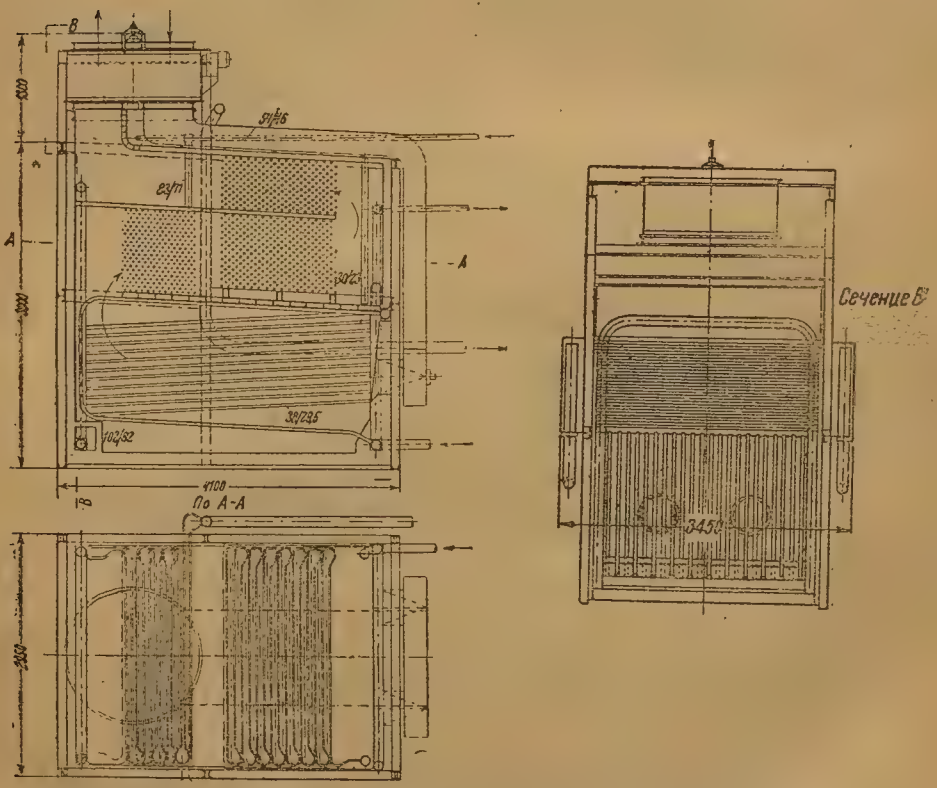


Рис. 373, 373 a. Проект котла Леффлера мощностью в 5000 *л. с.*

тель. После этого прекращают впуск пара из вспомогательного котла в котел Леффлера. Спустя еще 15 минут давление пара в котле можно довести до 130 *ати*, а температуру перегретого пара — до 480° Ц.

Для более полного представления о выгодности применения на судах котлов Леффлера приведем основные данные детально разработанных проектов: быстроходного парохода мощностью 120 000 *л. с.*, грузо-пассажирского парохода — 25 000 *л. с.* и эсминца — 100 000 *л. с.*

В табл. 141 с дизельной установкой сравниваются паросиловые установки, снабженные водотрубными котлами нормальной конструкции и котлами Леффлера.

Предполагается, что дизельная установка состоит из двухтактных двигателей двойного действия с числом оборотов, равным числу оборотов гребного вала.

По табл. 141 вес, габаритные размеры и стоимость установки с котлами Леффлера значительно ниже, чем у двух других сравниваемых установок. Расход мазута в установке с котлами Леффлера почти на 80% больше, чем в дизельной установке. Однако, если учесть, что стоимость мазута равна 0,42 чешской кроны, а стоимость

Таблица 141

№ по пор.	Наименование	Размерность	Паровые котлы Леффлера		Дизель-моторы
1	Давление пара	*ати*	23	130	
2	Вес установки	*кг/л. с.*	34,8	15,9	65
3	Занимаемый объем	*м³/л. с.*	0,234	0,12	0,21
4	Расход топлива, включая расход мощности для судовых нужд 1%	*кг/л. с. ч*	0,43	0,235	0,186
5	Стоимость 1 *кг* горючего в чешских кронах	чеш. кр./*кг*	0,42	0,42	0,54
6	Стоимость горючего на 1 *л. с. ч* $[(4_1) \times (3_1)]$	чеш. кр./*л. с.* (*т*)	0,18	0,099	0,101
7	Запас топлива на 5 суток $(3_1) \times 24 \times 5$	*кг/л. с.* Sc	52	28,5	22,4
8	Общий вес топлива и машины (6) (1)	*кг/л. с.*	86,8	44,4	47,4
9	Общий занимаемый объем топливом и машинной установкой	*м³/л. с.*	0,289	0,15	0,233
10	Средняя избыточная полезная грузоподъемность против 23 *ати*	*кг*	—	$5{,}07 \cdot 10^6$	0
11	Объем для избыточного груза против 23 *ати*	*м³*	—	16 600	6 600
12	Стоимость установки на 1 *кг* .	чеш. кр./*кг*	14,4	27,5	14
13	Стоимость установки на 1 *л. с.* (12) × (1)	чеш. кр./*л.с.*	500	437	110
14	Общая стоимость установки (13) × 120,000	чеш. кр.	$60 \cdot 10^6$	$52{,}5 \cdot 10^6$	$109 \cdot 10^6$

1 *кг* нефти, потребляемой дизелями, составляет 0,52 чешской кроны, то получим, что расходы на топливо в дизельной установке будут даже на 2% выше, чем в установке с котлами Леффлера.

В табл. 142 приводятся основные данные запроектированных пароходов в 25 000 *л. с.*

Таблица 142

Наименование	Размерность	Паровые котлы			Дизель-мотор
		нефтяное отопление	пылеугольное отопление		
			котел Леффлера	котел Леффлера	
Давление пара . . .	*ати*	35	130	130	
Вес главных машин установки	*кг/л. с.*	35	33,6	36,1	65
Занимаемый объем .	*м³/л. с.*	0,28	0,28	0,29	0,295
Расход топлива, включая 1% мощ. вала для освещения и 70 ед. т/*л.с.* для отопления	*кал/л. с.*	2880	2400	2600	1860
Стоимость горючего 1 *кг* при теплотворной способности нефти в 10 000 *кал* и угля в 7 000 *кал*	чеш. кр./*кг*	0,42	0,42	0,12	0,54
Стоимость горючего на 1 *л.с.ч*	чеш. кр./*л. с.*	0,121	0,101	0,045	1,101
Запас горючего на судне на 20-суточный рейс	*кг/л.с.ч*	138	115	178	89
Общий вес топлива и машины на 1 *л. с.* . .	*кг/л. с*	173	148,6	214,1	154
Общий вес	*кг*	$452 \cdot 10^6$	$3{,}7 \cdot 10^6$	$5{,}33 \cdot 10^6$	$3{,}85 \cdot 10^6$
Стоимость установки на 1 *кг*	чеш. кр./*кг*	18,9	13,1	22,7	14
Стоимость установки на 1 *л. с.*	чеш. кр./*л. с.*	680	780	820	910
Общая стоимость установки (10) × 25000	чеш. кр.	$16{,}5 \cdot 10{,}6$	$19{,}5 \cdot 10{,}6$	$20{,}5 \cdot 10{,}6$	$22{,}7 \cdot 10{,}6$
Годовой расход на амортизацию и обслуживание (11) × 0,17 . .	чеш. кр./год	$2{,}8 \cdot 10{,}6$	$3{,}31 \cdot 10{,}6$	$10{,}48 \cdot 10{,}6$	$3{,}85 \cdot 10{,}6$

В проекте пароходов в 25 000 *л. с.* каждый (табл. 142) сравнивались установки с водотрубными котлами нефтяного и пылеугольного отопления и дизельная установка.

Наиболее экономичной оказалась установка с котлами Леффлера пылеугольного отопления, хотя к. п. д. котла при пылеугольном отоплении на 5% ниже, чем при нефтяном. Примерно такие же данные получились и в установке в 100 000 *л. с.* для эсминца.

Общий вес механизмов с топливом в установке с котлами Леффлера получается меньше на 77%, чем в установке с водотрубными котлами. Таковы же соотношения габаритных размеров и расходов топлива.

Таблица 143

Минный истребитель в 100 000 *л. с.*

Наименование	Размерность	Паровые котлы		Дизель-моторы
		треугольного типа	котел Леффлера	
Давление пара в котле . .	*ати*	20	130	
Вес установки	*кг/л. с.*	10	9,1	9,5
Занимаемый объем	*м³/л. с.*	0,057	0,038	0,065
Потребная площадь . . .	*м²/л. с.*	0,0085	0,0053	0,0105
Расход нефти, включая 1% мощности вала для освещения и т. п.	*кг/л. с. ч*	0,47	0,272	0,206
Вес топлива при равном районе действия	*кг/л. с.* .	7	4	3,1
Общий вес (машинная установка и нефть) на 1 *л. с.* .	*кг/л. с.*	17	13,1	12,6
Общее занимаемое место (машинная установка и нефть) на 1 *л. с.*	*м³/л. с.*	0,0644	0,0422	0,0683
Стоимость установки на 1 *кг*	чеш. кр./*кг*	20	32	80
Стоимость установки на 1 *л. с.*	чеш. кр./*л. с.*	200	316	760

По данным табл. 143 установка с котлами Леффлера невыгодно отличается от установки с водотрубными котлами лишь в отношении стоимости: она примерно на 50% дороже.

Нижеприводимая таблица показывает, насколько велики получились бы преимущества судовой установки с котлами Леффлера на пароходе «Tacoma» водоизмещением 10 660 *т* (табл. 144) в сравнении с установкой, состоящей из цилиндрических котлов.

Таблица 144

Наименование	Обозначение	Размерность	Существующая установка	Проект с котл. Леффлера	Экономия в %
Мощность установки	N_i	*и. л. с.*	6 000	6 000	
Давление рабочего пара . .	$P_к$	*ати*	14	130	
Температура пара	$t_{пе}$	°Ц	310	500	
Поверхность нагрева двух двойных цилиндрических котлов . . .	$\Sigma H_к$	*м²*	1188,0	—	
То же двух ординарных цилиндрических котлов	ΣH	»	500	—	
Сумма расхода пара, включая вспомогательные механизмы . . .	ΣD	*кг/ч*	33 000	25 000	
Температура питательной воды .	$t'_к$	°Ц	110	—	
Расход мазута ($Q^р_н$ = 10 000 *кал/кг*)		*кг/ч*	2 560	2 100	18
Общий вес машинной установки	Σ	*т*	1 030	685	33,5
Необходимая длина для размещения установки при одинаковой ширине и высоте помещения . . .	L	*м*	29,7	25,2	15

Более полное представление о весовых характеристиках котла Леффлера может дать рис. 374. Здесь ординаты до кривой *1* показывают вес котельной установки в *кг/л. с.* Разница ординат между кривой *1* и *2* дает вес всей турбинной установки, а разница ординат кривых *2* и *3* показывает вес вспомогательных механизмов.

По гарантиям фирмы к. п. д. котла Леффлера при 10% нагрузке будет составлять 75%, а при перегрузке на 12% понизится до 70%. При нагрузке же в 25% к. п. д. котла можно довести до 88%.

Все вышесказанное о судовых котлах Леффлера относилось к проектам. Ниже в табл. 145 мы приводим основные характеристики котла Леффлера, установленного на итальянском пароходе «Conte Rosso».

Таблица 145

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Год постройки	—	—	1935
2	Мощность механизмов	$N_э$	*л. с.*	21750
3	Давление пара в котле	$P_к$	*ати*	130
4	Температура перегрева пара	$t_{пе}$	°Ц	475
5	Число котлов	—	—	1
6	Паропроизводительность котла	D	*т/ч*	23
7	Поверхность нагрева перегревателя и водяного экономайзера	$H_{пе+эк}$	$м^2$	169
8	Поверхность нагрева перегревателя и водяного экономайзера и воздухоподогревателя	$H_{пе+в.э+в.п}$	»	1237
9	Диаметр трубок пов. нагр. лучевосприятия	$d_{тр.\ эк}$	*мм*	26
10	То же перегревателя	$d_{тр.\ пе}$	»	34,5
11	То же водяного экономайзера	$d_{тр.\ в.\ эк}$	»	23
12	Тепловое напряжение топки	$\frac{Q}{V_т}$	$кал/м^3ч$	650
13	Паронапряжение поверхности нагрева пароперегревателя	$\frac{D}{H_{пе}}$	$кг/м^2ч$	135
14	Паронапряжение суммарной поверхности насоса	$\frac{D}{H_{пе+в.э+в.п}}$	»	18,5
15	Вес котла, готового к эксплоатации, без экономайзера и воздухоподогревателя, отнесенный к 1 *т* пара	$\frac{G_к}{D}$	*т/т*	2,95
16	То же, включая вес водяного экономайзера и воздухоподогревателя	$\frac{G_{к+эк+в.п}}{D}$	»	2,46

По данным профессора Жученко, английская фирма Эшер и Вис построила силовую установку высокого давления для миноносца[1].

[1] По данным проф. Жученко.
Водный транспорт. № 2, стр. 46—47, 1936.

Установка состоит из двух турбин мощностью в 100 000 *л. с.* Пар для работы турбины поставляется четырьмя котлами Леффлера.

Основные характеристики рассматриваемой установки приведены в табл. 146.

Таблица 146

Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
Мощность механизмов	$N_э$	*э. л. с.*	100 000
Число котлов Леффлера	—	—	4
Часовая паропроизводительность котла	D	*т/ч*	46,5
Давление пара	P	*ати*	126
Температура перегретого пара . .	$t_{пе}$	°Ц	512
Расход мазута на 1 *э. л. с. ч* . . .	$\frac{B}{N_э}$	*г/э. л. с. ч*	270

Для уменьшения веса и габаритных размеров котла каждый котел снабжен только одним коллектором.

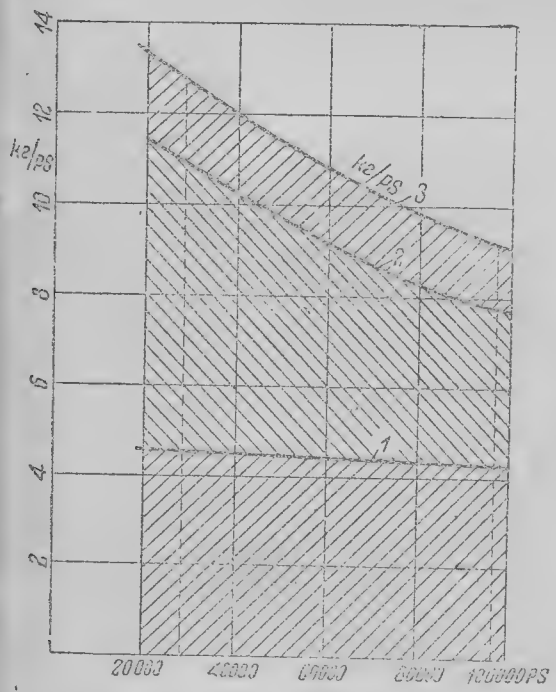


Рис. 374. Весовые характеристики котла Леффлера.

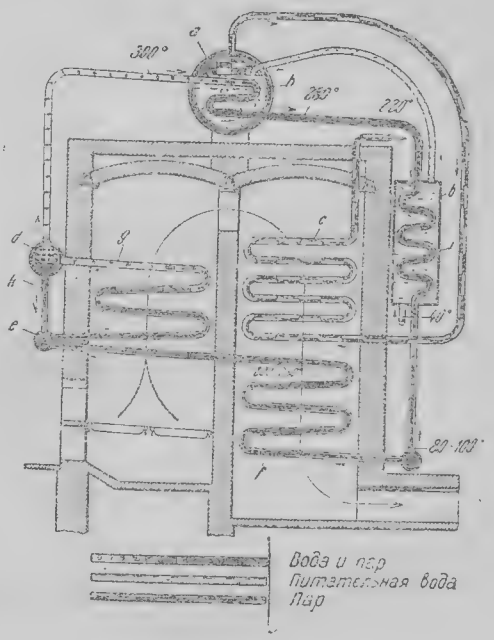


Рис. 375. Схема котла Шмидта.

При этом удельное паронапряжение зеркала в коллекторе увеличивается не очень сильно. Часть питательной воды вводится в паропровод перегретого пара, идущего в коллектор. В паропроводе вода испаряется за счет теплоты перегрева пара. С той же целью умень-

шения веса и габаритных размеров котла Леффлера паровой перекачивающий насос и коллектор смонтированы в одном агрегате.

Эксплоатационные и опытные наблюдения над работой котлов Леффлера в стационарных установках, а также ряд выполненных проектов котлов Леффлера для судовых установок позволяют сделать следующее заключение относительно преимуществ и недостатков котлов Леффлера.

К преимуществам установок Леффлера следует отнести:

1) высокий к. п. д. установки и котла в частности,

2) небольшой вес котла, несмотря на то, что он работает при высоком давлении,

3) возможность увеличения радиуса плавания пароходов при оборудовании их котлами Леффлера,

4) меньшая чувствительность к качеству питательной воды.

Основными недостатками котлов Леффлера следует считать:

1) наличие наряду с обычным питательным насосом специального насоса для перекачивания пара по трубкам перегревателя. Перекачивающие насосы усложняют обслуживание котла и понижают надежность работы установки, добавляя еще один элемент для возможной аварии;

2) необходимость применения высококачественных сталей для выделки трубок перегревателя, так как перегреватель находится в чрезвычайно тяжелых термических условиях.

222. Котлы Шмидта

Другим типом котлов высокого давления, допускающих меньшие требования к качеству питательной воды, являются котлы Шмидта [1] (рис. 375). Образование пара в котле Шмидта схематически представлено на рис. 375. Вода из коллектора *e* поступает в змеевик *g*, расположенный в топке. В нем под действием теплоты топочных газов образуется пароводяная смесь, которая входит в коллектор *d*. В последнем происходит отделение воды от пароводяной смеси. Вода опять опускается в коллектор *e* и снова переходит в змеевик *g*, совершая таким образом непрерывное круговое движение.

Пар, осушенный в коллекторе *d*, поступает в змеевик *h*, помещенный в паровом коллекторе-испарителе *a*. Последний, как и испаритель у котлов Леффлера, расположен вне обмуровки. Насыщенный пар, проходя через змеевик, конденсируется и передает теплоту, полученную от топочных газов, на образование пара в коллекторе. Пар в виде конденсата возвращается по трубам *h* в коллектор *e* и из него вновь совершает свой прежний цикл движения.

Пар, образовавшийся в испарителе *a*, направляется в перегреватель, а оттуда к потребителю пара. Система змеевиков, расположенных в топке и в испарителе *a*, носит название первичной системы. Испаритель *a* и перегреватель *c* получаемого в испарителе вторичного пара называются вторичной системой.

Поверхность нагрева змеевика в паровом коллекторе получается небольшой, так как теплопередача от насыщенного пара к воде составляет при чистых поверхностях около 3000 *кал/м²ч* ° Ц.

Выгодной особенностью котла является малая вероятность обра-

[1] Англ. пат., № 323146, 1929 г. Нем. пат., № 206786, 1907 г.; № 449801, 1927 г. Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 127—161, 1927. Hartmann. Betriebsanforderungen. Hochdruck-Dampfanlagen auf Schiffen. Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 266—283, 1935.

зования накипи в первичной системе, так как по последней непрерывно циркулирует один и тот же почти абсолютно чистый конденсат. Благодаря этому вся первичная система работает очень надежно. Возможность пережога трубок первичной системы почти исключена, так как здесь практически отсутствует накипеобразование.

Первоначально многие специалисты сомневались в возможности получения в первичной системе рассматриваемого котла хорошей циркуляции.

Опытные наблюдения над установкой котла Шмидта в Биттерфильде, где длина каждой ветви первичной системы составляла 28 *м*, опровергли эти опасения.

Питание водой котла Шмидта производится лишь в паровой коллектор. Только изредка приходится пополнять первичную систему незначительным количеством чистого конденсата взамен неизбежной утечки пара в ней через различного рода неплотности.

Утечка воды и отложение накипи на змеевике в паровом коллекторе котла Шмидта не вызывает опасности пережога котла, так как змеевик *h*, обогреваясь паром, не может перегореть. Тем не менее, обнажение змеевика и образование на нем накипи является крайне нежелательным, так как это ведет к понижению паропроизводительности котла.

Специальные опыты, проведенные для определения чувствительности котла к качеству питательной воды, дали хорошие результаты. Котел работал в течение 14 дней неочищенной питательной водой, причем продувка котла ни разу не производилась.

После вскрытия парового коллектора по окончании опытов оказалось, что последний заполнен почти на одну треть шламом, а на змеевике был слой накипи, который сравнительно легко мог отскабливаться и смываться горячей водой.

Следующим преимуществом котла Шмидта по сравнению с прямоточными котлами является его относительно неплохая аккумулирующая способность. Водяное пространство вторичной системы котла значительно больше, чем у прямоточных котлов.

Для нормальной работы котла необходимо вести контроль за состоянием уровня воды в первичной системе. При небольшой убыли воды в первичной системе пар, образующийся в ней, может перегреться. Это вызовет снижение паропроизводительности, так как теплопередача от перегретого пара раза в три хуже, чем от насыщенного.

Кроме водомерного стекла, в качестве контроля за уровнем воды в первичной системе может служить и температура пара перед вводом в змеевик *h*. Воздушный подогреватель установлен в верхней части дымовой трубы. Подогрев воздуха в воздушном подогревателе происходит за счет теплоты газов, уходящих в дымовую трубу. Газы, проходя внутри большого числа труб, передают часть своего тепла воздуху, который омывает трубки воздушного подогревателя снаружи.

Котлы Шмидта начали строиться еще в 1926 г., к настоящему же времени можно считать, что они вышли из стадии экспериментальной проверки. Среди других котлов высокого давления котлы Шмидта получили наибольшее распространение.

Число котлов высокого давления, построенных до 1933 г.

Котлы Леффлера	9	установок
Котлы Бенсона	9	„
Котлы Атмоса	4	„
Котлы Шмидта	13	„

Эти данные одновременно говорят и об общем слабом распространении котлов высокого давления в капиталистическом мире, что в основном объясняется не столько недостатками данных котлов, сколько отсутствием потребности в установке их на капиталистических предприятиях.

В эпоху господства монополий внедрению новой техники, в частности широкому распространению новейших конструкций судовых котлов, особенно резко препятствует наличие старого основного капитала.

223. Котел Гартмана

Успех распространения котлов Шмидта вызвал появление других котлов высокого давления, работающих по этому же принципу. По схеме котла Шмидта Гартман [1] разработал проект опытного судового котла. Испытания опытного агрегата Гартмана, проведенные летом 1926 г., дали удовлетворительные результаты.

После этого Гартман, руководствуясь наблюдениями над экспериментальным судовым котлом, разработал проект судовой котельной установки, состоящей из двух котлов (рис. 376). Схему парообразования в котле Гартмана можно представить так: пароводяная смесь, образующаяся в экранных трубках *I*, поднимается в верхние экранные коллекторы. Здесь из нее выделяется основная масса воды, а пар, как показано стрелками на рис. 376, направляется в трубчатый змеевик *II*; в последнем пар конденсируется. За счет тепла, выделяемого при конденсации пара, в коллекторе *VII* образуется вторичный рабочий пар давлением в 65 *ати*.

Чтобы через трубки змеевика *II* могла происходить теплопередача, давление в змеевике *II* должно быть на 30—40 *ати* больше, чем в коллекторе *VII*. При таком перепаде давления обеспечивается необходимая разница температур порядка 25—30° Ц в змеевике *II* и коллекторе *VII*.

Выходящий из змеевика конденсат направляется в подогреватели питательной воды *III*, где он переохлаждается. Из подогревателей *III* конденсат первичного пара направляется в экономайзер *IV* (рис. 376, вид с фронта). В экономайзере *IV* вода нагревается до температуры, близкой к температуре кипения при 100 *ати*. Из экономайзера вода поступает в верхние экранные коллекторы, а из них спускается по необогреваемым наружным трубкам в нижние экранные коллекторы.

Далее цикл парообразования и конденсации в первичной системе повторяется вновь.

Вторичный пар, образующийся в коллекторе *VII*, направляется в перегреватель *V*, а из него, перегретый до температуры 450° Ц, уходит к главным механизмам. Дымовые газы, как показано стрелками на рис. 376, омывают последовательно пучки труб перегревателя *V*, экономайзер *IV* и воздухоподогреватель *VI*.

Перегородки, заставляющие газ двигаться по вышеупомянутому направлению, составлены из части трубок топочного экрана, перегревателя *V* и экономайзера *IV*. Воздух в подогреватель входит с фронта, а выходит сзади котла.

Воздух получает дополнительный подогрев в щелевом пространстве задней стенки топки, через которое воздух проходит в зольник.

---

[1] Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft. S. 127—161, 1927. Hartmann O. H. Entwicklungsmöglichkeit des Höchstdruckdampfers im Schiffsbetrieb.

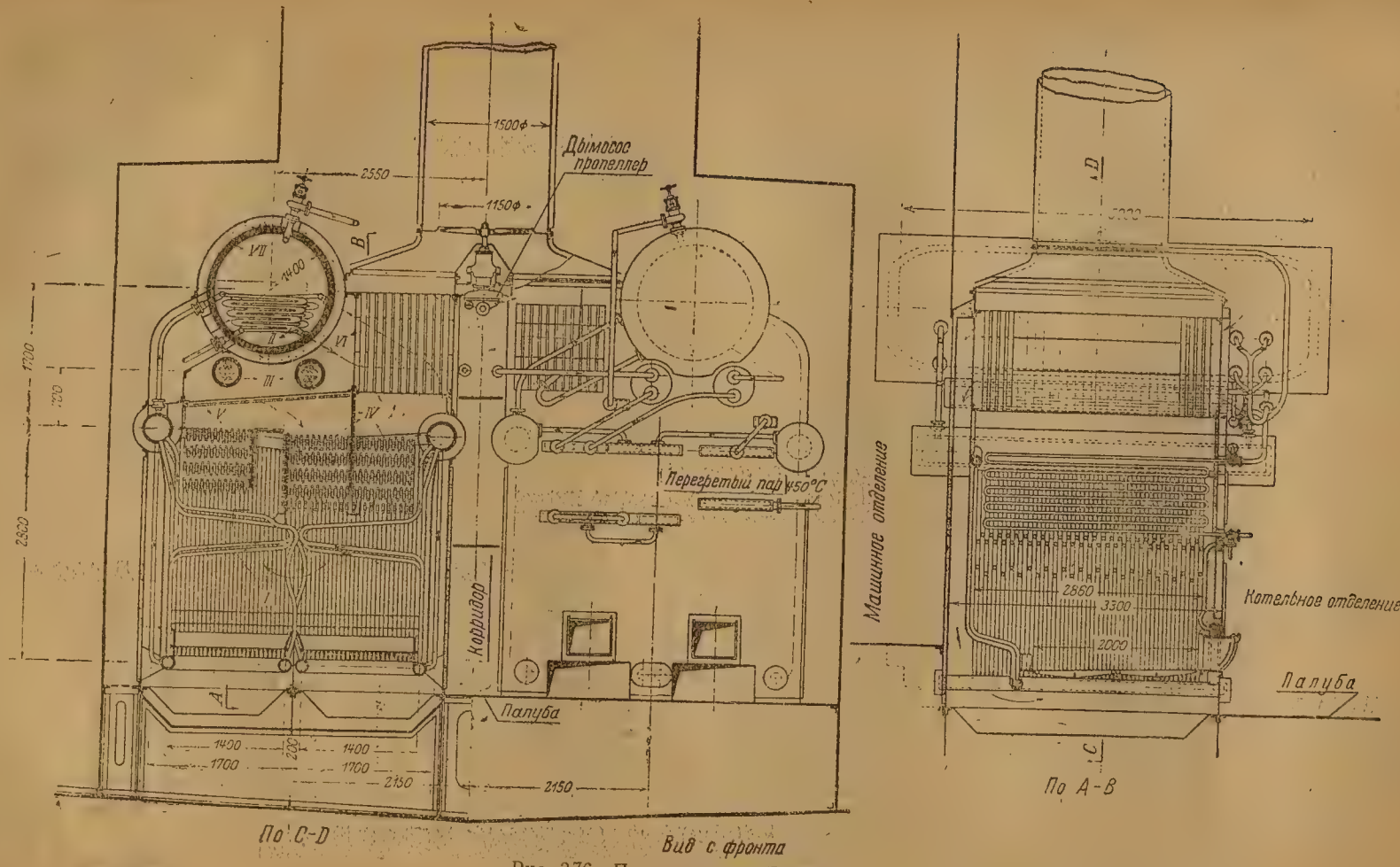


Рис. 376. Проект котла Гартмана.

Такое устройство воздуховодов весьма выгодно. Оно не требует расхода металла и занимает меньше места. Одновременно оно позволяет уменьшить вес внутренней и внешней изоляции задней стенки топки.

Сопротивления движению газов и воздуха преодолеваются за счет разряжения, создаваемого дымососом. Последний установлен в дымоходе.

Просасывание, а не нагнетание воздуха и газов через топку, газоходы и воздухоподогреватель следует считать недостатком данной котельной установки. При неплотностях в кожухе дымовые газы могут разбавляться большим количеством воздуха, просасываемого через неплотности кожуха. Это вызывает увеличение тепловых потерь с уходящими газами. Одновременно могут повыситься потери тепла с несгоревшими частицами угля, уносимыми в дымовую трубу.

Увеличение уноса в трубу может быть объяснено сравнительно большим разряжением в топке, создаваемым дымососом.

Основные расчетные характеристики рассматриваемого котла приведены в табл. 147.

Таблица 147

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
1	Рабочее давление пара	P	*ати*	65
2	Температура перегретого пара . .	$t_{пе}$	°Ц	450
3	Площадь колосниковой решетки в двух котлах	R	$м^2$	10,4
4	Весовое напряжение решетки . .	$\frac{B}{R}$	$кг/м^2ч$	120
5	Паропроизводительность двух котлов	$2D$	*кг/ч*	10 000
6	Проектная мощность котла	$N_к$	*л. с.*	25 000
7	Полный вес 2 котлов без дымовой трубы	$2G_к$	*т*	85
8	Вес котлов на 1 *т* производимого пара	$\frac{G_к}{D}$	*кг/кг*	8,5
9	Полный вес котлов, включая циркулирующую рабочую воду . . .	$G_{к+в}$	*т*	95
10	Полный вес котлов с водой на 1 *т* пара	$\frac{G_{к+в}}{D}$	*кг/кг*	9,6
11	Полный вес котлов с водой на 1 *л. с.*	$\frac{G_{к+в}}{N_к}$	*кг/л. с.*	384

Как показывают данные табл. 147, вес котла Гартмана на 1 *т* пара получился сравнительно большим; он даже превышает вес многих шотландских котлов постройки 90-х гг. XIX в.

Значительный вес котла Гартмана объясняется наличием в нем коллектора *VII* больших размеров. Стенки последнего получаются толстыми, потому что он должен работать под давлением порядка 65 *ати*. Утяжеляет установку Гартмана и наличие в коллекторе *VII* змеевиков. В котлах нормальных конструкций змеевики отсутствуют.

К числу других недостатков котлов Гартмана можно отнести:

1) необходимость поддерживать давление в первичной системе на 30—40 *ати* выше давления рабочего пара;

2) наличие большого числа фланцевых соединений и уплотнений при проходе труб через стенки коллекторов и большую сложность конструкции котла;

3) малую доступность к змеевикам парового коллектора для очистки их от накипи;

4) большой вес котла из-за наличия в нем нескольких цельнокованых коллекторов и дополнительных поверхностей.

Котел Гартмана имеет очень важное для судовых условий преимущество: он менее чувствителен к качеству питательной воды, но большой вес котлов вряд ли даст им возможность получить распространение на судах.

224. Применение пара высокого давления в СССР

Наряду с быстрым ростом всего народного хозяйства рост энергохозяйства СССР особенно выделяется (табл. 148).

Таблица 148

Производство электроэнергии (в млн. *квтч*)

Годы на 1/I	Все электростанции СССР	Электростанции Главэнерго
1921	520	310
1922	775	475
1923	1 146	630
1924	1 562	702
1926	3 508	865
1927	4 205	1 156
1928	5 007	1 579
1929	6 224	2 315
1930	8 368	3 758
1931	10 687	5 762
1932	13 540	8 297
1933	16 366	10 260
1934	20 580	13 487
1935	25 900	18 000

В 1935 г. в СССР выработано 25,9 млрд. *квтч* против 5,2 млрд. *квтч* в 1928 г. На фоне этих достижений мы имеем большие сдвиги в области применения пара высокого давления (табл. 149).

Уже к началу 1935 г. общая мощность теплоэлектроцентралей Главэнерго повышенного и высокого давления достигала 300 тыс. *квт*.

Историческим является постановление пленума ЦК ВКП(б) в 1931 г. о постройке в Москве ТЭЦ в ВТИ им. Дзержинского. Это постановление, под руководством большевиков стройки ТЭЦ ВТИ выполнено.

В 1935 г. на этой станции были освоены два мощнейших в мире котла высокого давления системы Леффлера, каждый с часовой паропроизводительностью в 130 *т* при давлении пара в 130 *ати*.

Там же установлен величайший в мире по паропроизводительности советский прямоточный котел системы Л. К. Рамзина, целиком изготовленный на советских заводах и из советских материалов [1].

[1] Газета „Техника" от 15 августа 1935 г.

Таблица 149

Группировка котлов ГРЭС Главэнерго по давлениям

Годы на 1/I	Всего имелось котлов			В том числе								
				до 18 *ат*			19—30 *ат*			Свыше 30 *ат*		
	Количество	Суммарная поверхность нагрева $м^2$	Средняя поверхность нагрева одного котла $м^2$	Количество	Суммарная поверхность нагрева $м^2$	% к суммарной поверхности нагрева	Количество	Суммарная поверхность нагрева $м^2$	% к суммарной поверхности нагрева	Количество	Суммарная поверхность нагрева	% к суммарной поверхности нагрева
1930	254	129 462	510	221	93 914	72,6	33	35 548	27,4	—	—	—
1931	413	21 682	525	322	127 570	58,2	72	70 826	32,7	19	18 236	8,4
1932	513	282 417	550	363	139 123	49,3	106	96 671	34,2	44	46 623	16,5
1933	637	362 489	569	441	166 610	46,0	127	114 000	31,4	69	81 879	22,6
1934	624	390 450	626	405	160 897	41,2	132	117 435	30,1	87	112 118	28,7
1935	593	404 625	677	355	149 874	37,0	143	123 883	30,6	100	130 868	32,4

Максимальная длительная паропроизводительность этого котла составляет около 200 *т* пара в 1 час. Рабочее давление в котле равно 130 *ати*, а температура перегрева пара равна 500° Ц.

ТЭЦ является экспериментальной базой ВТИ для изучения пара высокого давления. Эта лаборатория имеет не только всесоюзное, но и мировое значение, ибо изучение процессов работы котлов высокого давления здесь опирается на работу гигантских котлов в эксплоатационной обстановке.

Благодаря плановому ведению народного хозяйства и отсутствию частной собственности на средства производства Советский Союз построил такую заводскую лабораторию, которую не в состоянии

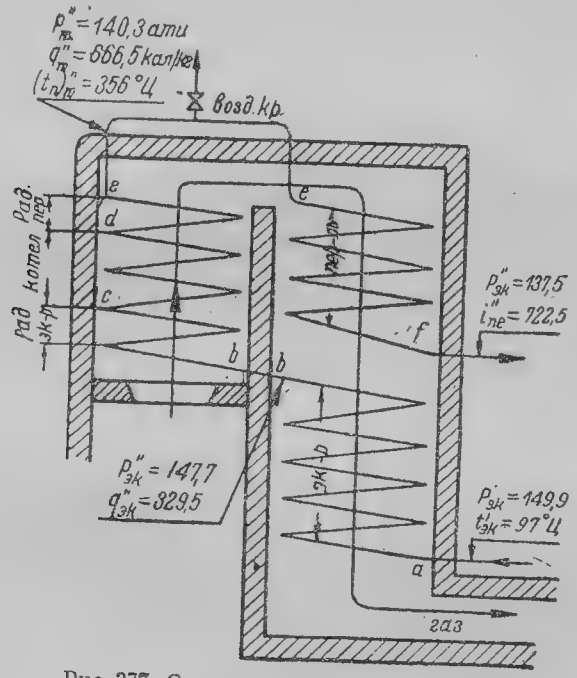


Рис. 377. Схема опытного котла Рамзина.

построить ни одна мировая капиталистическая фирма, ни один буржуазный научно-исследовательский институт.

Рассмотрим опытные и эксплоатационные характеристики первого советского прямоточного котла системы Рамзина, схема устройства которого показана на рис. 377.

Поверхность нагрева котла состоит из одной трубы. Питательная вода поступает сначала в конвекционный экономайзер *ab*. Из последнего вода переходит в радиационный экономайзер *bc*. В точке *c* заканчивается нагревание воды до температуры насыщения. При дальнейшем движении воды по радиационной поверхности нагрева котла *cd* вода полностью испаряется. Полученный пар перегревается в радиационном *de* и конвекционном *ef* пароперегревателях и, наконец, уходит к потребителю пара.

На рис. 378 наглядно показано изменение температуры давления и теплосодержания воды и пара по длине трубы. Для удобства на оси абсцисс вместо длины трубы отложены поверхности нагрева отдельных элементов котла, соответствующие длине трубы, соста-

вляющей эти элементы. Зона испарительности в котле может сдвигаться по трубе вправо или влево в зависимости от нагрузки котла.

Как показано на рис. 378, вода в экономайзере нагревается до температуры насыщения. На участке трубы, где происходит испарение, температура воды несколько падает. Понижение температуры на этом участке объясняется уменьшением давления пароводяной смеси, ввиду наличия в трубе гидравлических сопротивлений. На

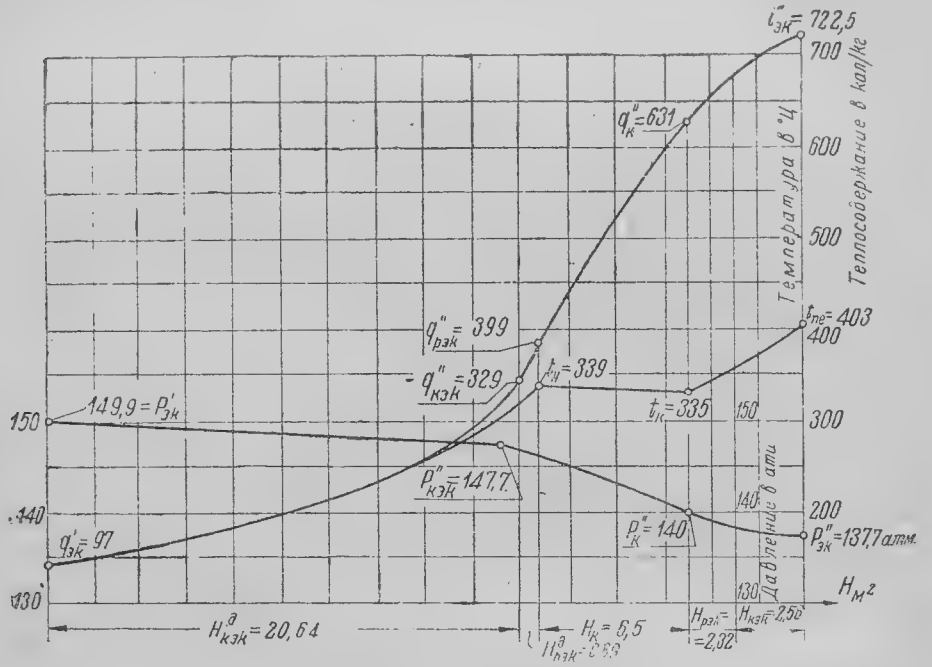


Рис. 378. Изменение температур, теплосодержания и давления пара по длине трубы в опытном котле Рамзина.

участке трубы *cd* происходит перегрев пара до необходимой температуры.

В табл. 150 приведены величины поверхностей нагрева отдельных элементов котла.

Таблица 150

Наименование	Обозначение	Размерность	Эффективная поверхность нагрева	Действительная поверхность нагрева
Радиационная часть установки .	$H_р'$	$м^2$	3,05	9,6
Конвекционный перегреватель .	$H_{пе}$	„	—	2,56
Конвекционный экономайзер . .	$H_{эк}$	„	—	20,64
Суммарная номинальная поверхность нагрева	$\Sigma H_к$	„	26,25	32,80

Опытный прямоточный котел к настоящему времени уже достаточно исследован. Проведено большое число испытаний. Основные

результаты десяти испытаний котла приводим по Изв. ВТИ, № 6 (84), стр. 24—28, 1933 г. (табл. 151).

Как показывают данные табл. 151, паронапряжение поверхности нагрева котла достигает 500—600 *кг/м²ч*, т. е. равно паронапряжению котлов Велокса. Рассматриваемый котел весьма выгодно отличается от других котлов своими высокими коэфициентами теплопередачи.

При максимальной нагрузке коэфициент теплопередачи у конвекционного перегревателя доходит до 110 *кал/м²ч* °Ц вместо обычных 20—40 *кал/м²ч* °Ц.

У конвекционного экономайзера коэфициенты теплопередачи достигают 70—80 *кал/м²ч* °Ц против обычных 10—25 *кал/м²ч* °Ц.

Параллельно с разработкой проекта опытного прямоточного котла начались работы по проектированию котла промышленного типа. Одновременно разрабатывался технологический процесс его постройки. Некоторые операции для производства данных котлов пришлось изобретать заново. Так, были изобретены и широко реализованы новые способы электростыковой и термитной сварки труб, дающие при правильном выполнении операции 100%-ные плотность и прочность.

Эти способы сварки почти освободили ее от индивидуальных особенностей и квалификации сварщиков, так как по секундомеру и путем взвешивания точно дозировалось количество теплоты и время ее воздействия. Примерно то же можно сказать и о некоторых других операциях постройки прямоточных котлов.

Прямоточный котел Рамзина был рассчитан на нормальную паропроизводительность в 150 *т* в час и максимальную в 200 *т* в час при давлении пара в 140 *ати* и температуре перегрева в 480—500° Ц. Пар указанных параметров поступал в турбину высокого давления, где он должен был срабатываться до 26 *ати*. Из турбины высокого давления около 85% всего пара должно поступать во вторичный перегреватель, откуда пар выходит уже при давлении в 24,5 *ати* и температуре 400°.

В топках рассматриваемого котла должен сжигаться порошок подмосковного угля марки М. С. Но так как пылеприготовительное хозяйство котла было не готово, то эксплоатация его до 1935 г. проводилась на мазуте.

На рис. 379 показана схема устройства котла промышленного типа.

Питательная вода в виде чистого конденсата поступает в две кованые распределительные коробки AA_1, расположенные на фронтовой и задней стенках топки. Отсюда вода входит в шесть параллельно идущих подвесных труб диаметром 70/54 *мм*.

К трубам приварены «крылышки», на которых уложены трубы, составляющие всю радиационную часть поверхности нагрева.

Пройдя подвесные трубы, вода поступает в две коробки, расположенные над боковыми стенками топки. Из боковых коробок вода опускается по двум трубам в нижние коллекторы конвекционного экономайзера. Последний состоит из двух симметричных змеевиков. Каждый змеевик составлен из 44 параллельных трубных витков, диаметром 30/42 *мм*. Пройдя конвекционный экономайзер и коллекторы B и B_1, вода входит в радиационный экономайзер, состоящий из 24 параллельных витков труб диаметром 30/42 *мм*. Дальше диаметр этих труб увеличивается до 40/52 *мм*. В радиационном экономайзере происходит нагревание воды до температуры насыщения. Затем вода направляется в поверхность нагрева котла, где она полностью испаряется. На дальнейшем пути происходит небольшой перегрев. Во

Таблица 151

Результаты испытания опытного советского прямоточного котла ВТИ[1]

№ по пор.	Наименование	Обозначение	Размерность	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	20
1	Расход пара	D	*кг/ч*	3901	1727	1937	1920	2509	3004	2989	3712	1676	3721	2433
2	Температура пара	$t_п$	°Ц	427	407	414	428	412	407	403	407	415	403	353
3	Температура питательной воды перед экономайзером	$t'_{эк}$	°Ц	85	68	42	93	92	97	97	97	94	97	51,5
4	Давление перегретого пара	$P_п$	*ата*	140,4	140,1	142,0	141,3	141,1	140,3	140,5	140,5	137,7	137,5	35,8
5	Давление воды перед экономайзером	$P'_{эк}$	»	153,7	142,9	145,6	145,4	147,6	148,1	149,2	150,2	140,8	149,9	57,0
6	Падение давления в агрегате	$\Delta P_а$	»	13,3	2,8	3,6	4,1	6,5	8,0	18,9	11,7	3,1	12,4	21,2
7	Полезная тепловая нагрузка агрегата	$Q_ч$	*т·кал/ч*	2565	1130	1335	1250	1600	1885	1865	2315	1075	2330	
	Топливо и газы													
8	Расход нефти	B	*кг/ч*	—	193	217	177	231	288	286	363	163	364	243
9	Коэфициент избытка воздуха за экономайзером	$\alpha_{ух}$	—	—	1,82	1,89	1,90	1,64	1,67	1,57	2,02	2,02	1,57	1,51
10	Температура уходящих газов[2]	$T_{ух}$	°Ц	—	349	386	362	439	468	498	520	363	522	476
11	Газовое сопротивление котла и перегревателя	$\Delta S_{к+пе}$	*мм* вод. ст.	—	—	13,5	5,8	8,7	12,5	11,4	16,2	7,5	24,5	13,5
12	Газовое сопротивление экономайзера	$\Delta S_{эк}$	» » »	—	—	46,9	27,9	48,2	71,8	62,9	97,8	28,1	99,9	46,2
13	Газовое сопротивление всего агрегата	$\Delta S_а$	» » »	—	—	60,4	33,7	56,9	84,3	74,3	114,0	35,6	124,4	59,7
14	К. п. д. всего агрегата	$\eta_а$	%	—	69,6	63,5	71,9	69,6	66,8	65,9	65,2	68,0	64,9	72,2
	Напряжение поверхности нагрева													
15	Поверхность нагрева самого котла	$H^н_к$	$м^2$	2,13	1,79	1,72	1,66	1,85	1,88	1,98	1,97	1,78	2,03	2,569
16	Съем пара с 1 $м^2$ котла	$d^н_к$	*кг/м²ч*	1860	965	1125	1150	1355	1595	1510	1890	940	1835	953
17	Съем пара с 1 $м^2$ агрегата	$d^н_а$	*кг/м²ч*	149	66	74	73	96	115	114	141	64	142	927
18	Съем пара с 1 $м^2$ действительной поверхности нагрева котла	$d^д_к$	»	592	307	358	366	432	507	480	602	299	584	303
19	Съем пара с 1 $м^2$ действительной поверхности нагрева агрегата	$d^д_а$	»	119	53	59	58	77	92	91	113	51	114	74
20	Теплонапряжение радиационных поверхностей нагрева (топка)	$q^н_т$	*т·кал/м²ч*	429	235	272	272	326	381	357	441	218	411	—
21	Теплонапряжение котла	$q^н_к$	»	454	245	282	290	338	397	376	464	243	459	367
22	Теплонапряжение конвекционного перегревателя	$q^д_{кп}$	»	148	27	32,5	24,5	41,5	52	57	79	27	82	44,7
23	Теплонапряжение конвекционного экономайзера	$q^д_{эк}$	»	43	15,5	20,5	17	24	28,5	30,5	38	16,5	42,0	25,6
24	Теплонапряжение поверхности нагрева всего агрегата	$q^н_а$	»	98	43	51	48	61	72	71	89	41	89	64
25	Тепловое напряжение действительной поверхности нагрева котла	$q^д_к$	»	145	78	90	92	107	126	120	148	77	146	117
26	Продолжительность опыта	Z	час	—	—	—	—	7,5	—	—	—	—	7,33	6,92

[1] Изв. ВТИ, № 6 (84), стр. 24—28, 1933.
[2] Неисправленная.

избежание застоя паровых пузырьков здесь движение пароводяной смеси направлено вверх.

Движение вниз можно допустить лишь для воды, не содержащей паровых пузырьков, и для перегретого пара. Направление движения пароводяной смеси вверх является обязательным для всех без исключения систем котлов. В противном случае пар в трубках может застаиваться, особенно на поворотах. Застои пара могут вызвать местные перегревы, усиленную коррозию, пережог и даже разрыв трубок.

Слегка перегретый пар выходит из верхней части радиационного пароперегревателя в смесительные коробки, где происходит выравни-

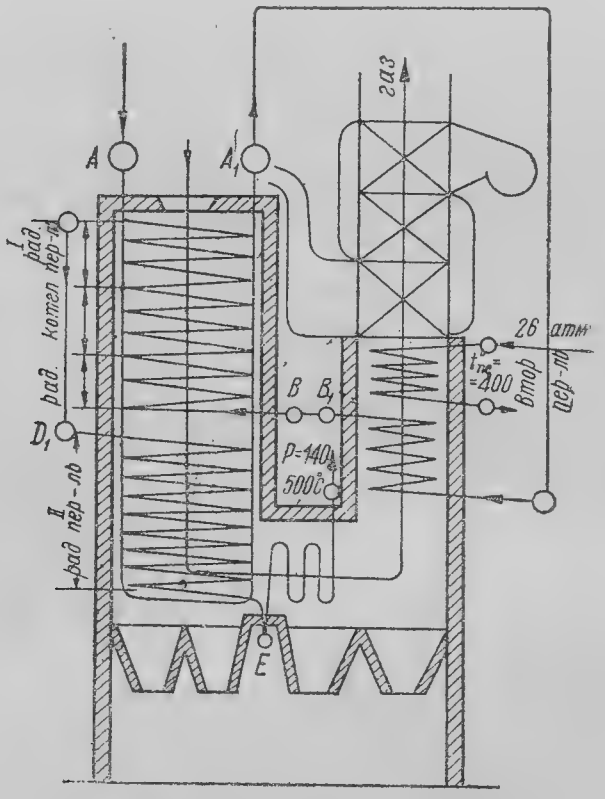


Рис. 379. Схема промышленного котла Рамзина, установленного на Т. Э. У. В. Т. И.

вание температур пара. Из смесительных коробок пар поступает в коллекторы *DD*, а из них во второй радиационный подогреватель, состоящий из 24 параллельных витков труб диаметром в 45/60 *мм*. Далее пар через коллектор *E* входит в конвекционный перегреватель, который состоит из 72 параллельных витков труб диаметром 30/42 *мм*. Из последнего пар с параметром $P_к = 140$ *ати* и $t_{пе} = 500°$ Ц уходит к потребителю пара через коллектор. Все трубы, соединяющие отдельные коробки вне обмуровки котла, имеют диаметр 125/159 *мм*.

Трубные витки расположены в топке так, что создают четыре квадратных шахты. В каждой шахте имеется одностороннее освещение факелом части трубных витков, расположенных против кирпичной кладки у двух стенок шахт. Трубные же витки, составляющие две другие стенки шахты, освещаются факелом с двух сторон.

На рис. 379 линией указано направление движения газов. Топочные газы движутся сначала сверху вниз, затем горизонтально через конвекционный пароперегреватель. Потом газы поворачиваются на 90° и проходят последовательно снизу вверх конвекционный экономайзер, вторичный перегреватель и воздушный подогреватель. Из последнего газы отсасываются дымососами и направляются в дымовую трубу.

В табл. 152 приведено распределение поверхностей нагрева по отдельным элементам котла.

Таблица 152

Наименование	Обозначение	Размерность	Цифровые величины
Радиационная поверхность топки по проекции	$H_т^н$	$м^2$	419
То же, измеренная по окружности трубок	$H_т^д$	»	930
Первичный конвекционный перегреватель	$H_{пе}^I$	»	171
Конвекционный экономайзер	$H_{эк}$	»	444
Итого поверхность нагрева части высокого давления	$\sum H_{в.д}^д$	»	1545
Вторичный перегреватель	$H_{пе}^{II}$	»	794
Итого пароводяная часть	$\Sigma H_у$	»	2339
Воздушный подогреватель	$H_{в.п}$	»	8472
Температура подогрева воздуха при нормальной нагрузке	$(t_в)'_{в.п}$	°Ц	350
То же при максимальной	$(t_в)''_{в.п}$	°Ц	400

Общий вес всех поверхностей нагрева пароводяной части (без воздушного подогревателя) с коробками, фасонами и соединительными трубами в пределах котла составляет 123,4, т. е. 617 *кг* на 1 *т* пара.

В отношении веса поверхностей нагрева прямоточный котел проф. Рамзина, как показывает табл. 153, стоит в более выгодном положении, чем другие новейшие типы котлов.

Расчетный к. п. д. брутто прямоточного агрегата при работе его на подмосковном угле должен быть равен при нормальной паропроизводительности 85%, а при максимальной — 82,5%.

Для питания котла прямоточный агрегат снабжен двумя поршневыми трехплунжерными насосами производительностью по 130 *т/ч* и напором в 200 *ати*. Каждый питательный насос спаривается с нефтяным трехплунжерным насосом производительностью 13,5 $м^3/ч$ и напором 50 *ати*. Посредством этих нефтяных насосов производилась подача нефти к механическим форсункам системы В и W.

На рис. 380 показана схема установки нефтяного и питательного насоса и привода к ним.

Таблица 153

Наименование	Вес в *кг/т* пара котлов						
	Прямоточный котел проф. Рамзина	Леффлера	Ганомаг	В и W	Ла Монта	Шмидта	Велокса
Вес испаряющей части котла . . .	56	1700	1100	1050	980	2600	—
Вес всей пароводяной части	617	2510	2000	1870	2110	3320	1430
Увеличение в весе	1	4	3,2	3,0	3,4	5,3	2,3

При эксплоатации котла основное внимание уделяется регулированию паропроизводительности, давления и температуры. Регулирование паропроизводительности производится изменением числа оборотов питательного насоса с 130 до 32,5 об/мин. Наибольшие отклонения температуры от заданного режима производились подрегулировкой.

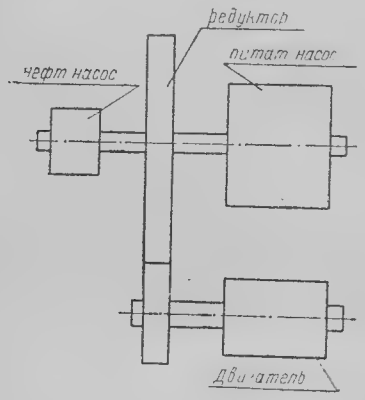


Рис. 380. Схема нефтяного и питательного насоса и привода.

Параллельно с изменением количества питательной воды, нагнетаемой в котел, производится и пропорциональное изменение количества мазута, подаваемого к форсункам. В противном случае может резко измениться температура перегретого пара. Соблюдение синхронизма в количестве питательной воды и сжигаемого мазута достигается путем постановки трехплунжерного нефтяного насоса на одном валу с питательным насосом.

Благодаря такому устройству, число ходов у питательного и у нефтяного насосов будет всегда одинаковым. Взаимная связь работы обоих насосов позволяет сохранить необходимую пропорциональность подачи питательной воды и топлива весьма просто и надежно.

По эксплоатационным наблюдениям, паропроизводительность котла в течение 15 сек. может меняться на 30%, причем отклонение температуры пара от нормальной происходит всего примерно на 15°. Спустя несколько минут отклонение температуры пара уменьшается до нуля даже без ее подрегулирования.

Возможные в процессе эксплоатации изменения заданных температур пара устранялись подрегулировкой количества нефти, поступающей в форсунки. Например, если температура низка, то увеличивают количество нефти, подводимой к форсунке. Увеличение подаваемой в форсунки нефти производится уменьшением открытия нефтяного клапана, перепускающего нефть из напорной линии насоса во всасывающую. Если температура пара высока, то приоткрывают перепускной клапан.

Поддерживание давления на заданный режим осуществляется изменением открытия дроссельного клапана, стоящего в конце первичного конвекционного пароперегревателя. Если давление в котле повышается, то открытие дроссельного клапана увеличивают, и, наоборот, если давление в котле понижается, то открытие дроссельного клапана уменьшают. Все изменения числа оборотов насосов и открытия клапанов могут производиться либо вручную, либо при помощи дистанционного управления со щита клапанами и насосами, либо, наконец, автоматическими регуляторами.

Регулирование избытка воздуха может производиться тоже или вручную, или дистанционным управлением заслонками дутьевых вентиляторов.

Тяга может регулироваться либо вручную кнопками, либо дистанционным управлением заслонками дымососов, либо автоматическими регуляторами.

Рассматриваемый прямоточный котел Рамзина первый раз был включен в сеть в декабре 1933 г. С 20 декабря 1933 г. по 21 июля 1935 г. котел проработал 6071 час и выработал 38 900 *т* пара. Средняя часовая нагрузка за указанный период составляла около 64 *т/ч*.

Часовая паропроизводительность в 150 *т* пара при давлении в 140 *ати* была получена 15 января 1935 г., а в мае 1936 г. нагрузка достигала 168 *т*. Следует заметить, что достигнутая часовая паропроизводительность котла Рамзина определялась не реальной возможностью агрегата, а графиком нагрузки и возможностями всей ТЭЦ.

Коэфициент времени работы котла в первом квартале 1935 г. составлял 0,75, а во втором 0,62. Отдельными периодами котел работал по 20—30 дней, а последний пуск — 50 дней.

Как показывает табл. 154, аварийных и неплановых остановок было мало.

Таблица 154

Причина остановки котла	Число остановок
Из-за разрыва одного сварочного шва в стыке (общее число стыковых сварок в трубной поверхности 3938)	1
Из-за неполадок вспомогательного оборудования	5
Из-за общестанционных причин	11
Из-за неправильных действий персонала и по условиям освоения агрегата	7

Тщательный осмотр полученного разрыва сварочного шва показал, что в месте сварки толщина стенок была равна 1—2 *мм* против остальной части трубы 7,5 *мм*.

До последних лет у многих инженеров-теплотехников существовало отрицательное отношение ко всем прямоточным котлам и в частности к котлам проф. Рамзина. Большинство из них считало малую аккумулирующую способность котла одним из главных его недостатков, так как это вызывало необходимость снабжения прямо-

точных котлов большим числом весьма сложных автоматов, приспособлений для дистанционного управления, клапанов, заслонок и механизмов. Недостатком считалась и необходимость снабжения котлов питательными поршневыми насосами, допускающими широкий предел регулировки. Данные насосы при высоких давлениях и мощностях получаются весьма тяжелыми и громоздкими.

Эксплоатационные наблюдения над работой промышленного прямоточного котла проф. Рамзина показали, что малая аккумулирующая способность не является отрицательной стороной котла. Наоборот, она приносит много выгод, как-то:

1) возможность весьма быстро изменять нагрузку котла в желаемых пределах,

2) уменьшение потерь тепла с котловой водой при остановках котла,

3) сокращение времени разводки паров в котле,

4) полное регулирование режима работы котла можно производить либо вручную, либо при помощи дистанционного управления, или, наконец, автомоторами-регуляторами. При приспособлении для управления автоматических регуляторов последних получается примерно столько же, сколько у нормальных водотрубных котлов в случае механизации управления их работой.

Отдаваемое предпочтение механизированному управлению котлами вполне оправдывается в условиях Советского Союза, так как это позволяет значительно облегчить труд и условия работы обслуживающего персонала котельной. При ручном управлении работой котлов открытие некоторых клапанов приходится производить при большом напряжении сил и при весьма высокой температуре окружающего воздуха. При дистанционном управлении открытие всех клапанов производится путем нажатия электрических кнопок на щите, вокруг которого поддерживается нормальная температура окружающего воздуха и необходимая чистота.

Потребность в снабжении прямоточных котлов автоматическими регуляторами и приспособлениями для дистанционного управления заставит наши заводы заняться производством этих приспособлений и автоматов и поднимет нашу технику на более высокий уровень, подобно тому, как поднялась техника котлостроения в связи с освоением производства прямоточных котлов. Увеличенный выпуск приборов позволит одновременно широко применить их и для управления работой котлов остальных конструкций и тем самым облегчит труд и условия работы многих тысяч работников электростанций и судовых котельных установок.

Неверно также и то утверждение, что для обеспечения нормальной работы прямоточных котлов необходимо применение поршневых питательных насосов. Необходимые пределы регулирования паропроизводительности можно получить и при помощи центробежных насосов.

Стремление уменьшить требования к чистоте питательной воды привело работников Бюро прямоточного котлостроения к мысли вынести из топки в зону нижних температур ту часть витков, в которой заканчивается испарение воды, так как опытные наблюдения показали, что наибольшее выпадение накипеобразователей получается в конце испарения.

Под руководством проф. Л. М. Рамзина Бюро прямоточного котлостроения разработало 12 проектов прямоточных котлов[1].

[1] Статья проф. Рамзина в газете „За индустриализацию“ от 6/II 1936.

Расчетная производительность котлов колеблется в пределах 1—300 *т/час*. Давление в котлах равно 22—140 *ата*. Котлы спроектированы для электростанций, морских и речных судов, аэропланов и т. п.

Прямоточные котлы системы проф. Рамзина имеют богатую перспективу применения их на судах нашего коммерческого флота: в сравнении с шотландскими котлами, которые до настоящего времени устанавливались на 95% судов, котлы проф. Рамзина позволяют уменьшить вес на 1 *т* пара в 5—8 раз. Одновременно они работают при более высоком к. п. д. — 85% против 55—60% у шотландских котлов.

Описание советского прямоточного котла, установленного на ТЭЦ ВТИ, закончим приведением заключения по работе и конструкции котла Рамзина, которое было составлено по поручению Наркома тяжелой промышленности группой специалистов-теплотехников профессоров и инженеров.

«На основании ознакомления с работой прямоточного котла, установленного на теплоэлектроцентрали Всесоюзного теплотехнического института, из изучения материалов по запроектированным прямоточным котлам проф. Рамзина, эксперты пришли к следующему заключению.

1. Прямоточный котел системы проф. Рамзина на давление 140 *ат* и паропроизводительностью до 200 *т* пара в 1 час, установленный на ТЭЦ ВТИ, представляет собой оригинальное конструктивное осуществление принципа прямоточности и позволил обойтись без ряда металлоемких элементов — барабанов, труб обратной циркуляции и коллекторов, присущих котлам принятых у нас конструкций.

Котел ТЭЦ ВТИ проработал в течение года свыше 5000 часов, неся промышленную нагрузку, и произвел свыше 300 000 *т* пара, не обнаружив никаких существенных дефектов и не потребовав длительных остановок, вызванных конструкцией.

2. К основным преимуществам прямоточного котла ТЭЦ ВТИ и рассмотренных проектов других прямоточных котлов системы проф. Рамзина, по сравнению с котлами принятых у нас систем, следует отнести значительно облегченный вес прямоточного котла (2,5—3 раза), меньшие его габариты, большую простоту монтажа котла, полную взрывобезопасность котла, большую надежность в эксплоатации в механической части вследствие отсутствия развальцовки труб, простоту и легкость регулирования паропроизводительности прямоточного котла в зависимости от заданного графика нагрузки, возможность в более простой форме осуществить большие паросъемы в одном агрегате и отсутствие потерь конденсата, вызываемых продувкой барабанных котлов.

Эти преимущества становятся особенно эффективными при давлении выше 100 *ат*, когда котлы всех систем требуют питания конденсатом или дестиллатом.

3. Прямоточные котлы системы проф. Рамзина являются, несомненно, техническим прогрессом в области котлостроения в СССР, поднимают эту отрасль и смежные с ней отрасли машиностроения и металлургии на более высокую техническую ступень и служат фактором, побуждающим проектирующие и производительные организации итти смелее по пути внедрения высоких давлений (выше 100 *ат*), более высоких тепловых показателей и применения более совершенных методов производства. Прямоточные котлы системы проф. Рамзина на давление 140 *ат* и производительностью до 200 *т* пара в 1 час ста-

вят СССР в деле котлостроения на уровень технических достижений передовых стран»[1].

225. Прямоточные котлы Зульцера

Интерес к постройке прямоточных котлов проявляется и за границей. За последние пять лет в Европе и Америке появилось большое количество конструкций прямоточных котлов. Из них наибольшую известность получили котлы Зульцера[2], Добла, Бабкока и Вилькокса, Пойрдю. Рассмотрение этих котлов мы опустим, так как они по принципам своего устройства мало чем отличаются от советских прямоточных котлов. Коротко остановимся лишь на попытках применить прямоточные котлы на судах.

Фирма Зульцер разработала прямоточный котел для установки его на пароходе «Kertosono». Основные характеристики парохода приведены в табл. 155.

Таблица 155

Время постройки парохода	1922 г.
Водоизмещение	16 500 *т*
Скорость хода	13 узлов
Тип установленных котлов	Трехтопочные цилиндрические
Число котлов	5
Поверхность нагрева каждого котла	255 *м*²
Нормальная часовая паропроизводительность	6 *т/ч*
Максимальная „ „	10 „
Давление пара в котле	14 *ати*
Мощность турбины	4500 *и. л. с.*

При модернизации парохода котел производительностью в 6 *т/ч* был заменен прямоточным котлом, постройку которого производила фирма Ди Шельде по чертежам фирмы Зульцер. Основные характеристики котла следующие:

Часовая паропроизводительность	21 *т/ч*
Давление в котле	60 *ати*
Температура перегрева	375°

Для использования пара высокого давления установлена предвключенная турбина, в которой пар должен срабатываться до 14 *ати*. По расчетам в результате модернизации скорость парохода должна увеличиться до 15 узлов.

На рис. 381 показана схема устройства прямоточного котла Зульцера, поставленного на пароходе «Kertosono».

---

[1] Газета „Техника“ от 15 августа 1935 г.
[2] Заявлен патент в Германии DRP № 603478, 11/XII 1931.

Главной особенностью этого котла, отличающей его от советского прямоточного, является способ регулировки температуры перегретого пара. Как видно из рис. 381, поддерживание постоянной температуры пара достигается вводом в перегреватель соответствующего количе-

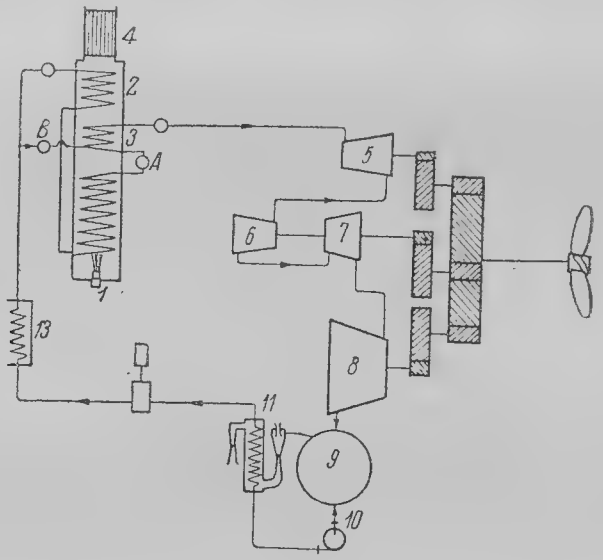


Рис. 381. Схема установки котла Зульцера на пароходе „Kertosono".

1 — форсунка; *2* — поверхность нагрева котла; *3* — поверхность нагрева перегревателя; *4* — поверхность нагрева воздухоподогревателя; *5* — предвключенная турбина высокого давления; *6* — турбина высокого давления; *7* — турбина среднего давления; *8* — турбина низкого давления; *9* — конденсатор; *10* — конденсатный насос; *11* — воздушный насос; *12* — питательный насос; *13* — подогреватель питательной воды.

ства питательной воды при повышении температуры пара и уменьшением числа оборотов питательного насоса при понижении ее.

На рис. 381а изображена трубчатая часть котла и его схема.

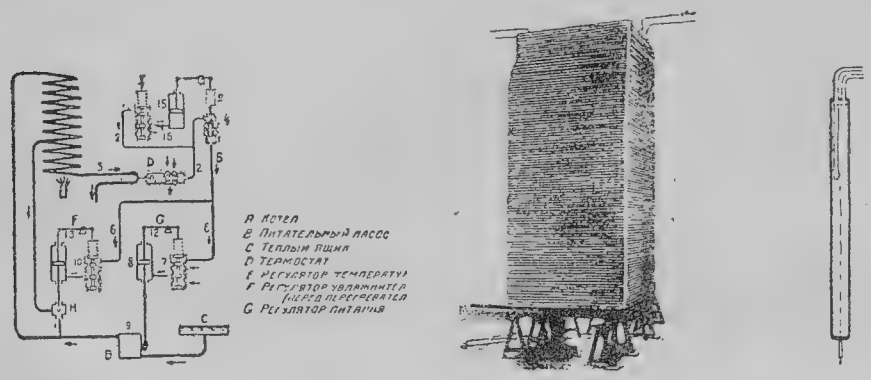


Рис. 381а. Трубчатая часть котла Зульцера и его схема.

Наряду с установкой прямоточного котла на пароходе «Kertosono» за границей имеются готовые проекты прямоточных котлов, которые будут осуществлены в кратчайший срок, как только получатся удовлетворительные результаты испытания рассматриваемого котла.

Применением прямоточных котлов начинают интересоваться и военные флоты. По литературным данным, в 1933 г. был спущен на воду бесшумный и бездымный катер; имеются косвенные сведения, что на этом катере установлен прямоточный котел типа Добла (рис. 382) со следующими характеристиками:

Разводка паров с холодного состояния	30 сек.
Температура перегретого пара	470°
Температура уходящих газов	300°
Содержание воды в котле	10 *л*
Мощность паровой машины	120 *и. л. с.*

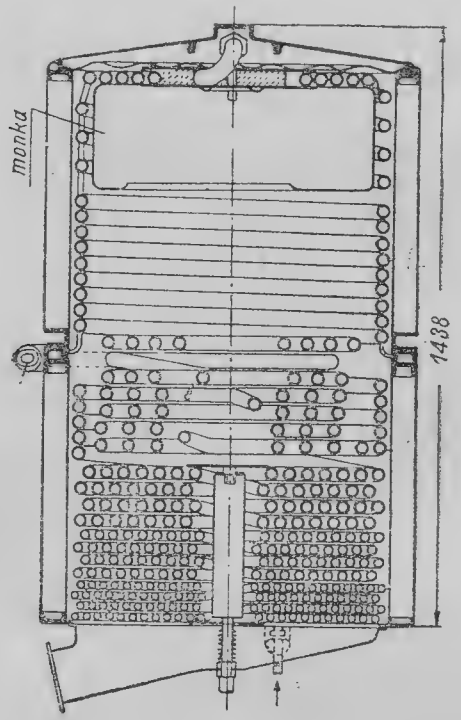


Рис. 382. Прямоточный котел Добла.

Бездымность катера достигается тем, что уходящие газы направляются не в вертикально стоящую дымовую трубу, а за корму через горизонтальную трубу типа выхлопных труб у катера с двигателями внутреннего сгорания. Выходное отверстие выхлопной трубы расположено у самой ватерлинии. Повидимому, дым выталкивается из выхлопной трубы вместе с прокачиваемой через нее водой.

ВЫВОДЫ

1. Для удовлетворения возросших требований к постройке и эксплоатации судовых паровых котлов, наряду с усовершенствованием ранее существующих систем, котлостроительные заводы и конструкторы разработали и построили за последние 15 лет новые оригинальные конструкции котлов высокого давления и специальные конструкции.

Так появились:

а) котлы специальных конструкций — Ла Монта и Велокса,

б) котлы высокого давления — Бенсона, прямоточные, Шмидта, Гартмана, Леффлера и др.

2. Первые опыты применения этих котлов в стационарных и судовых установках дали хорошие результаты, в особенности котлы Велокса и прямоточные.

3. Успех применения вышеуказанных котлов вызвал большое число подражательных конструкций (котлы типа Ла Монта, Велокса, прямоточные и др.).

4. Дальнейшая эксплоатационная проверка работы котлов специальных конструкций и высокого давления покажет, какие из них окажутся наилучшими для внедрения в судовых силовых установках.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЫСОКОГО ПЕРЕГРЕВА НА СУДАХ

226. Применение пара высокого давления и высокого перегрева

В настоящее время делаются смелые шаги по применению в паросиловых установках пара высокого давления и высокого перегрева, вводятся регенеративные процессы в турбинах.

Все эти мероприятия позволили значительно повысить к. п. д. установки, а главное дали богатую перспективу в области дальнейшего повышения к. п. д. паросиловой установки до уровня к. п. д. дизельной установки (табл. 156) [1].

Данная таблица показывает, что с повышением давления до 225 *ати* и его температуры до 550° Ц представляется возможным увеличить мощность, развиваемую 1 *т* пара, до 323 *квт* против 195 *квт* при $P_к = 20$ *ати* и $t_п = 320°$ Ц.

Уменьшение расхода пара на 1 *квтч* дает большие выгоды. При прочих равных условиях высокое давление позволяет:

1) уменьшить мощность испарителей,

2) держать меньший запас котловой воды в теплых ящиках.

Одновременно таблица показывает, что с повышением давления и температуры пара растет термический к. п. д. паросиловой установки. При увеличении давления пара до 130 *ати* и при температуре его в 480° Ц термический к. п. д. паросиловой установки можно повысить до 32,3%, т. е. довести его до уровня к. п. д. лучших дизельных установок.

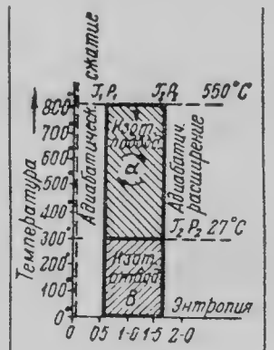
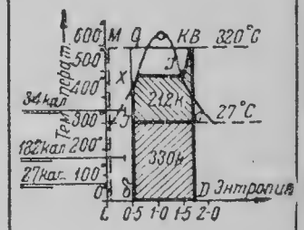
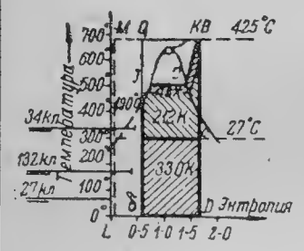
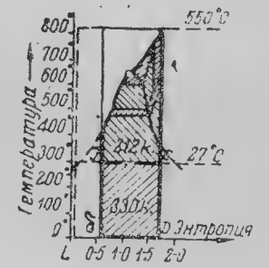
Выгодность применения пара высокого давления в паросиловых установках становится нагляднее, если учесть, что стоимость нефти для дизелей выше стоимости мазута, потребляемого в паросиловых установках (табл. 157—158) [2].

В табл. 158 приводятся сравнительные данные расходов нефти в дизельных установках. Расходы выражены в стоимости мазута при условии, что стоимость нефти будет в 1,25; 1,5; 1,75 и 2,0 раза выше стоимости мазута.

---

[1] Табл. 156 составлена по материалам доклада, сделанного на международной энергетической конференции в 1930 г. д-ром Ярославом Хавлицек (Jaroslav Havlicek), см. „Löffler-Kessel". Berlin, 1930.

[2] Судостроение, № 5, стр. 74, 1935.

Наименование	Обозначение	Размерность			
Давление пара	P	*ати*	20	40	130	225
Температура перегретого пара	$t_{пе}$	°Ц	320	425	480	550
Температура питательной воды	$t'_к$	°Ц	190	190	190	190
			Цикл Карно	Идеальный круговой процесс 1 *кг* пара		
				при повышении давления и температуры перегрева		
Теоретический к. п. д. паросиловой установки . .						
Цикл Карно $\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{523}{823} = 63{,}6$	η_t	%	39	44	50,8	53,5
Для образования 1 *кг* пара передается тепла воде .	$\Delta i_н$	*кал/кг*	542	590	668	708
Для образования 1 *кг* пара вводится тепла в топку при к. п. д. котельной установки = 85%	$\frac{BQ^р_н}{D}$	»	638	695	786	834
Теоретическое превращение тепла в работу . . .	$\Delta i_{турб}$	»	212	212 + 48 = 260	260 + 78 = 338	338 + 40 = 378
При срабатывании пара с 225 до 130 *ати* при $\eta_{турб} = 0{,}725$ турб. . . .	$\Delta i_{I\ ст}$	»	—	—	—	29
При срабатывании пара от 130 до 40 *ати* при $\eta_{турб} = 0{,}725$	$\Delta i_{II\ ст}$	»	—	—	56,6	56,6
При срабатывании пара от 40 до 20 *ати* при $\eta_{турб} = 0{,}78$	$\Delta i_{III\ ст}$	»	—	30,4	36,4	36,4
При срабатывании пара от 20 до вакуума 96,5% при $\eta_{турб} = 0{,}84$	$\Delta i_{IV\ ст}$	»	178	178	178	178
	$\sum \Delta i$	*кал/кг*	178	214,4	271	300

Наименование	Обозначение	Размерность				
При данных условиях 1 *m* пара может развить мощность (на кл. генератора) при $\eta_{генер} = 0{,}97$	$\frac{N_i}{D}$	*квт/m*	203	242	307	338
Расход энергии на собственные нужды:						
а) на работу питательного насоса	$\frac{N_{i\,нас}}{D}$	*квт/m*	0,68	1,36	4,5	7,5
б) на работу циркуляционного насоса и воздушного конденс. насоса .	$\frac{N_{i\,ц.\,нас}}{D}$	"	5,4	5,4	5,4	5,4
в) на работу воздушн. конд. насоса и вентилятора .	$\frac{N_{i\,неф.\,и\,вент}}{D}$	"	2,2	2,2	2,2	2,2
Полезная мощность, получаемая на кл. генератора	$N_{i\,пол}$	"	194,7	233	294,9	323,9
Расход пара на 1 *квтч* чистой энергии	$\frac{D}{N_{i\,пол}}$	*кг/квтч*	5,13	4,285	3,39	3,09
Термический к. п. д. паросиловой установки . . .	η_t	%	26,3	28,9	32,3	33,5
Термический к. п. д. на новых силовых дизельных установках:						
„Duisburg“	η_t	%	34			
„Milwaukee“	η_t	%	30,8			
„Portland“	η_t	%	30,6			
„Caribia“	η_t	%	36,7			

Продолжение табл. 156

Таблица 157

Сравнительная стоимость разных сортов топлива, выраженная в стоимости угля в 1932 г.

Название рейсов	Уголь	Мазут	Сырая нефть
Гамбург — Нью-Йорк	1	1,38	2,32
Гамбург — Тихий океан (север)	1	1,1	2,0
Гамбург — Индия	1	1,94	2,08
Гамбург — Ла Плата	1	1,2	1,88
Гамбург — Тихий океан (юг)	1	1,07	2,26
Гамбург — Дальний Восток	1	1,64	2,15
Гамбург — Австралия	1	1,24	1,55

Таблица 158

Расход нефти на 1 *э.л.с.ч* в дизельных установках в пересчете на стоимость мазута

Наименование	Обозначение	Размерность	Расчетные данные			
Стоимость сырой нефти						
Стоимость мазута			1	1,25	1,5	1,75
Расход мазута в дизельной установке	$\frac{B}{N_э}$	*г/э.л.с.ч*	170	213	253	298
Расход мазута в паросиловой установке	$\frac{B}{N_э}$	*г/э.л.с.ч*	220	226	226	232
Мощность установки	$N_э$	*э.л.с.*	18000	28000	25000	15000
Давление пара перед турбиной	$P'_т$	*ати*	150	100	100	100
Температура пара перед турбиной	$t'_т$	°Ц	260	450	450	450

227. Увеличение к. п. д. паросиловых установок при применении регенеративного процесса в турбинах

Наряду с применением пара высокого давления увеличение термического к. п. д. установки в последние годы достигается путем применения в турбинах регенеративного процесса подогрева воды паром, отбираемым из ступеней турбины. Такой способ подогрева, как показывает рис. 383, позволяет уменьшить расход топлива на 1 *квтч* примерно на 8%.

Более наглядное представление о выгодности применения регенеративного процесса в турбинах дает табл. 159.

Таблица 159

Увеличение к. п. д. паросиловой установки при применении регенеративного процесса в турбинах

Наименование	Обозначение	Размерность	Расчетные данные			
Давление пара	P	*ата*	10	40	130	225
Температура перегретого пара . . .	$t_{пе}$	°Ц	320	425	480	550
Температура питательной воды . .	$t'_к$	°Ц	190	190	190	190
Расход топлива на 1 *квтч* полезной энергии без регенеративного процесса в турбине	$\frac{B}{N_i}$	*кг/квтч*	0,327	0,298	0,267	0,267
Термический к. п. д. установки без регенеративного процесса в турбине	η_t	%	26,3	28,9	32,3	33,5
Расход мазута при регенеративном процессе в турбине	$\frac{B}{N_i}$	*кг/квтч*	0,300	0,274	0,246	0,236
Термический к. п. д. установки при регенеративном процессе в турбине	η_t	%	28,6	31,4	35	36,4

Благодаря применению регенеративного процесса возможно уменьшить вес и габаритные размеры части турбины низкого давления и

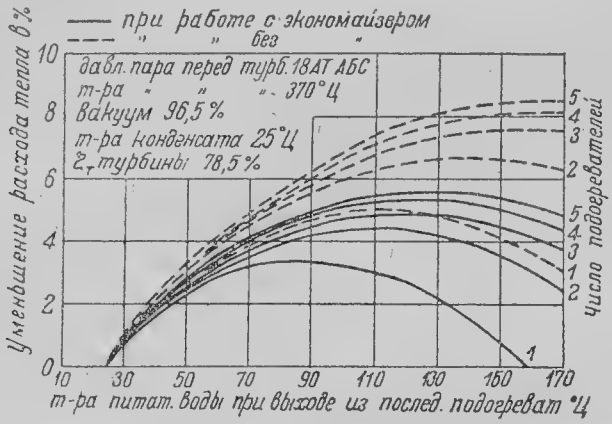


Рис. 383. Уменьшение расхода топлива в зависимости от температуры питательной воды и числа подогревателей в регенеративном процессе турбин.

холодильника. При регенеративном процессе подогрева воды до 150° Ц количество пара, отбираемого на ступенях турбины, достигает 20% от общего расхода пара.

Необходимо подчеркнуть, что приводимые в таблицах значения столь низкого расхода топлива на 1 *квтч* и весьма высокие к. п. д.

паросиловых установок еще не достигнуты, но они являются вполне реальными в наши дни в стационарных установках [1].

Применение высоких давлений и температур пара, а также регенеративных процессов в турбинах в судовых установках идет значительно медленнее, чем в стационарных, так как там наряду со стремлением получить высокие к. п. д. часто решающее влияние имеют малый вес и габаритные размеры паросиловых установок.

В стационарных установках, где пар высокого давления в настоящее время уже получил широкое распространение, вес и габаритные размеры паросиловых установок играют второстепенную роль. Там установки высокого действия часто продавали даже по весу, откуда у владельцев котло- и турбостроительных заводов выработался взгляд, что чем тяжелее установка, тем она выгоднее.

Совсем иначе дело обстояло в судовых установках. Здесь из-за стремления уменьшить вес котлов и турбин редко применяют давление выше 100 *ати*. Наиболее часто применяется давление в 75 и 65 *ати*. Такое давление выгодно тем, что оно не требует вторичного перегрева, вызывающего значительное утяжеление и усложнение паросиловой установки.

ВЫВОДЫ

1. Основным мероприятием по повышению экономичности работы судовых паросиловых установок будет в дальнейшем применение пара высокого давления и перегрева, а также регенеративного процесса в турбинах.

2. Теоретические работы показывают, что повышение давления до 120 *ати* и температуры пара до 500° Ц позволяет увеличить к. п. д. паротурбинной установки до уровня к. п. д. лучших современных дизельных установок на судах.

3. В ближайшие годы в судовых паросиловых установках давление пара будет редко повышаться выше 75 *ати*. Такое давление позволяет обойтись без вторичного перегрева пара, при котором обычно усложняется и утяжеляется установка.

4. Давление пара в 75 *ати* в судовых установках в настоящее время позволяет наилучшим образом сочетать противоположные требования уменьшения до минимума веса и габаритных размеров и увеличения до максимума к. п. д. паросиловой установки.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА К X ГЛАВЕ

1. Potter A. A., Solberg H. L. and Hawkins G. A. Characteristics of high-pressure steam generator. Am. Soc. Mech. Engrs Trans. V. 54, № 32, стр. 9—21 и (дискуссия) 21—27, Nov. 15 1932.

2. Solberg H. L. High-pressure steam research at Purdue University. West Soc. Eng-r, Ind. V. 37, № 6, Dec. 1932.

3. Potter A. A., Solberg H. L. and Hawkins G. A. Characteristic of high-pressure series steam generator. Am. Soc. Mech. Engrs advance paper, № 33, p. 13, Nov. 30, Dec. 4, 1931.

[1] Специфические противоречия капиталистического производства тормозят широкий переход на пар высоких давлений и температур. Как отмечал Мюнцингер, переход германских электростанций от 20 до 100 *ат* требует только 7% дополнительных капиталовложений и взамен обеспечивает по крайней мере 15% снижения расхода топлива. Однако, такая экономия возможна на каждом киловатте только при условии полной нагрузки станций, что в условиях кризисов и депрессий, неотъемлемых от капитализма, представляет неразрешимую проблему. (*Прим. ред.*).

4. Potter A. A., Hawkins G. A. and Solberg H. L. Purdue high-pressure boiler. Power. Vol. 74, № 22, p. 798—801, Dec. 1, 1931.
5. Solberg H. L., Hawkins G. A. and Potter A. A. Flow distribution in forced circulation once through steam generators. Am. Soc. Mech. Engrs Trans. V. 56, № 11, p. 841—849, Nov. 1, 1934.
6. Weisselberg A. Experience with high pressure boilers in Central Europe. Power. Vol. 72, № 17, p. 644—648, 1930.
7. Coutant J. G. General characteristics of high-pressure steam boilers. Power. № 7, p. 52—53, VII 1930.
8. Bauer G. Die Aussichten für Höchstdruckdampf im Schiffsbetrieb. Schiffbau. V. 32, № 8, S. 177—181, 1931.
9. Jacobus D. S. Developments in high steam pressures and temperatures. West Soc. Engrs. V. 36, № 4, стр. 227—248 (дискуссия), 248—252, Aug. 1931.
10. Darling C. S. High pressure steam in marine plants. Mar. Eng. a. Motorship Bld. V. 52, № 625, p. 398—400, 1929.
11. Jacobus D. S. Developments in high-pressure boilers. Engrs Soc. West Penn. Proc. V. 43, № 9, p. 398—409; 409—416 (дискуссия), 1927.
12. Four years of progress in high-pressure boiler design. Power. V. 68, № 7, p. 273—274, Aug. 14, 1928.
13. Yarrow H. E. The design and construction of high-pressure water tube boilers. Eng-ng. V. 126, № 3270, p. 341—342, 1928.
14. King J. H. Marine boilers for higher pressures and temperatures and their contribution to greater economy. Journ. Am. Soc. Naval Engrs. V. 40, № 2, p. 238—256, 1928.
15. Stillman J. B. Marine boilers for high-pressures. Journ. Am. Soc. Naval Engrs, V. 40, № 2, p. 286—295, 1928.
16. Frahm H. Betriebsicherheit und Wirtschaftlichkeit von Höchstdruckdampfanlagen auf Schiffen. WRH. V. 12, № 24, S. 403—407, 1931.
17. Hoover D. N. Rules for construction of high-pressure boilers. Am. mar. Engr. V. 27, № 12, p. 9—10, Dec. 1932.
18. Losche. Hochdruck und Hochleistungsdampfkessel. Zeit. des Bayerischen Revisions Vereins. V. 36, № 9, 10 и 11, стр. 103—107, стр. 117—119, стр. 128—130, 1932.
19. Potter A. A., Hawkins G. A. and Solberg H. L. Purdue high pressure boiler. Journ. Am. Soc. naval engrs, V. 44, № 1, 1932.

По котлам Ламонта

1. Bleicken B. La Mont Kessel im Schiffsbetrieb. VDI, № 40, S. 958, 1932.
2. Rudorff D. W. The La Mont boiler and its application to marine plants. Trans. of the Inst. of Mar. Engrs. V. 47, № 3, p. 67—72, Apr. 1935.
3. Ruscherweyh. La Mont Schiffskessel für Dampfschiffahrts-Gesellschaft „Neptun", Bremen, WRH. № 22, S. 315—320, 1934.
4. Treulsen K. Nadel-Ekonomiser und Lufterhitzer. Arch. für Wärmewirtschaft, № 10, 1932.
5. Herpen A. Th. Der La Mont Kessel. Die Wärme, № 49, S. 809—816, 1935.
6. Vorkauf H. La Mont steam boiler. Eng. Progress, V. 15, № 2, p. 35—39, Feb. 1934.
7. Leistungsteigerung bei Kesselumlaufen mit La Mont Wasserwänden. Arch. für Wärmewirtschaft, V. 15, № 9, S. 239, Sept. 1934.
8. Herpen T. Dampferzeuger mit Zwangumlauf und mit zwangumläufiger Wasserverteilung. VDI. V. 75, № 20, S. 617—622, 1931.
9. Ruschwegh O. Der La Mont Dampferzeuger in seiner Entwicklung zum Niederdruck und Höchstdruck-Schiffskessel. Jahrbuch d. schiffbautechnischen Gesellschaft. B. 34, S. 178—208, 1933.
10. Немировский Л. Принцип Ла Монта в применении к судовым котлам. Водный транспорт, № 3, 1934.
11. Родатис К. Ф. и Постников Г. С. Исследование работы экрана с принудительной циркуляцией. Изв. ВТИ, № 8 (106), стр. 1—11, 1935.

По котлам Велокс

12. Stodola A. Leistungs- und Regelversuche an einem Velox-Dampferzeuger. VDI, № 14, S. 429—436, 1935.
13. Pressure furnace boiler is revolutionary development. Power, № 15, p. 562—564, 12/IV, 1932.
14. Noack W. C. The Velox-boiler and „over 100 per cent efficiency". Engineer, V. 155, № 4017, p. 22—23, 1933.
15. Schlegel E. Der Wirkungsgrad des Velox-Kessels beim Verpuffungsbetrieb. Stahl und Eisen. № 46, S. 1189—1190, 1933.

16. The Velox steam generator. Engineering. № 3561, p. 431—432, 1934.
17. Swallow M. The Velox steam generator. Engineer. № 4083, p. 387—388, 576—578, 1933.
18. Brown-Boveri „Velox" boiler. Mar. Engineer. № 683, p. 230, 1934.
19. Meyer Adolphe. La chaudière „Velox" à suralimentation. Bull. Techn. de Bureau Veritas. № 10, p. 209—213, 1934.
20. Meyer A. The Velox steam generator: a supercharged boiler. Shipbuilder, № 303, p. 352—357, 1935.
21. Stodola A. Output and regulation tests on Velox steam generator. Mar. Engineer. № 694, p. 192—193, 1935.
22. Meyer A. The Velox steam generator. Mech. Engineering, № 8, p. 469—478, 1935.
23. Meyer A. Possibilities on land and sea of the Velox steam generator. Boiler maker, № 8, p. 207—211, 1935.
24. Swallow M. The Velox steam generator. Engineering, p. 469—472, 20/IV 1934; p. 526—528, 4/V 1934.
25. Вайсман М. Характерные особенности паропроизводителя Велокс. Сборник НИВКа ВМС РККА, № 3, стр. 37—55, 1934.
26. Македон Ю. А. Применение парогенератора Велокс в судовых установках. Судостроение. № 12, стр. 32—38, 1934.

По котлам Бенсона

27. The Benson boiler in the „Uckermark". Mar. Eng-r, p. 464—467, 1931.
28. Hermann F. Die Verwendung von Höchstdruckkesseln im Schiffsbetrieb mit besonderer Berücksichtigung des Benson Kessels. Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft, S. 77—94, 1932.
29. Eule M. Der Benson Dampfprozess im Schiffsbetrieb.. Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft, S. 410—434, 1928.
30. Installation d'appareils à haute temperature et haute pression sur le cargo „Uckermark" de la ligne Hambourg — Amerique. Bull. techn. du Bureau Veritas. P. 104, april 1932.
31. Goos Emil. Betrieb und Ergebnisse des Benson Kessels auf D. „Uckermark". Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft, B. 33, S. 95—109, 1932.
Frahm H. Там же, стр. 77—94. Die Verwendung von Höchstdruckkesseln im Schiffsbetrieb mit besonderer Berücksichtigung des Benson-Kessels.
32. Öhlmüller F. Benson land and marine boiler construction and results. Steam engineer. V. 11, № 2, p. 64—70, 1932.
33. Goss E. Super pressure steam plant on SS. „Uckermark". Eng. progress, Vol. 13, № 1, p. 1—6, Jan. 1932.
34. Öhlmüller F. Benson land and marine boiler construction and results. Mech. eng. V. 55, № 1, p. 50, Jan. 1933.
35. Gleichmann H. Neues vom Benson Kessel. Arch. für Wärmewirtschaft, V. 14, № 6, S. 99—101, Juni 1933.
36. Progress of Benson boiler. „Mar. News", V. 20, № 1, p. 28—9 a. 32, June 1933.
37. Quelsser H. Der Bensonkessel. Für die Technik und Frachtverkehr, V. 27, № 1/2, S. 1—4, jan. 12, 1934.
38. Gleichman. Die Entwicklung des Bensonkessels. Papier-Fabrikant. B. 31, № 51, S. 690—91, Dec. 17 1931; B. 32, № 8, S. 85—89, 1934.
39. Öhlmüller. Influence of Benson boiler on development of power station. Inst. Elec. Engrs. V. 75, № 452, p. 161—170; дискуссия 170—84, 1934.
40. Josse. Untersuchungen am Benson Kessel. VDI. V. 73, № 51, S. 1815—19, 1929.
41. Gleichmann H. Recent developments of the Benson boiler. Power plant eng. V. 34, № 11, p. 612—613, 1930.
42. Marine critical pressure boiler. Power. V. 74, № 24, p. 870—872, Dec. 15, 1931.
43. Queisser H. Benson boiler versus Loeffler. Power. V. 69, № 23, p. 936—937, June 4, 1929.
44. Gleichmann H. Benson process for extra high steam. Eng. and boiler house rev. V. 42, № 7, p. 374—375, 1929.
45. Blanke H. D. Design and construction details of the Benson critical pressure boiler. Nat. eng. V. 33, № 2, p. 49—56, 1929.
46 La chaudière Benson pour la production de vapeur à haute pression. Génie civil. V. 93, № 18, p. 429—431, nov. 3, 1928.
47. Gleichmann H. Die Heizkraft mit Benson-Kessel im Kabelwerk Gartenfeld der Siemens-Schuckertwerke. Siemens-Zeit. V. 8, № 3, S. 179—185, 1928.
48. Gleichmann H. Das Benson Verfahren zur Erzeugung. VDI. V. 72, S. 1037—46, 1928.

49. Benson high pressure steam generation at the critical temperature. Chem. & Industry, V. 43, p. 249—250, 1923.
50. The scientific principles of the Benson high pressure boilers, development of design of first. Boiler House Rev. V. 37, № 10, p. 358—360, 1924.
51. Goos E. Super pressure steam plant on SS. „Uckermark". Eng. Progress. V. 13, p. 1—6, Jan. 1932.
52. Gleichmann G. Die Entwicklung des zwanglaufröhren Benson-Kessels. Die Wärme, № 28, S. 459—462, 1933.
53. Benson boiler to operate at all pressures. Power. V. 77, № 9, p. 478, 1933.
54. Öhlmüller F. Variable-pressure operation with the Benson boiler. Power. № 4, p. 206—207, 1934.
55. Klindwort E. Hochdruckdampf auf Schiffen. VDI. № 36, S. 1051—52, 1934.
56. Jebens O. Moderne Hochdruckdampfanlagen für Schiffe. WRH. № 12. S. 150—155. 1934.
57. High pressure steam generators. Shipb. & Shipp. Record, № 25, p. 660—661, 1934.
58. High pressure boilers. Shipb. & Shipp. Record, № 11, p. 285, March 14 1935.
59. Рудницкий А. Н. Котлы высокого давления Бенсона и Шмидт-Гартмана. Изв. ВТИ, № 6 (84), стр. 44—52, 1933.
60. Развитие и перспективы применения прямоточных котлов Бенсона. Энергетическое обозрение. Теплотехнический выпуск, № 8, стр. 14, 1933.

По котлам Леффлера

61. La chaudière Loeffler et les installations à vapeur marines. Journ. de la marine march. № 853, p. 1455—56, 1935.
62. Krainer P. Der Loeffler-Kessel als Schiffskessel. Schiffbau, № 22. S. 370—375. 1932.
63. Loeffler boiler for the „Conto Rosso". Shipbuilder, № 304, p. 400, 1935. То же WRH, № 13, p. 226—227, 1935. Trans. of the Inst. of Mar. Eng-rs. V. 47, № 3, p. 72—76. 1935. Mc Ewens. The Loeffler marine boiler.
64. Loeffler-Kessel. Gesammelte Vorträge gehalten am 18, 19 und 20 Juni 1930 während der Weltkraftkonferenz Berlin. Berlin 1930.
65. Englert. La chaudière Löffler dans les installations fixes, les installations marines et les chemins de fer. Génie civil, V. 98, № 23 et 24, p. 568—570, june 6, 1931, et p. 588—592, june 13, 1931.
66. Englert. Zahlenmässiges vom Löffler-Kessel. Mitteilungen aus den Forschungsanstalten, V. 1, № 4, p. 69—79, Apr. 1931. См. также Shipbuilder. V, 38, № 251, p. 408—409, Apr. 1931; Mech. Eng. V. 53, № 9, p. 677—682, 1931.
67. Development of Löffler boiler. Eng. and boiler house rev., V. 46, № 4, p. 238—240, Oct. 1932.
68. Löffler boiler. Fuel Economist, V. 9, № 102, p. 254—255, March 1934.
69. Mc Even S. Löffler system of steam production. Inst. fuel advance. Mtg. p. 12, Nov. 9, 1934.
70. Löffler H. Some historical notes on Löffler boiler. Steam eng. V. 3, № 11, p. 475, Aug. 1934.
71. Josse E. Untersuchungen am Löffler-Kessel. VDI. V. 78, № 25. S. 771—776. 1934.
72. Knodel H. A 1000-hour trial on a 1700 lb. Loeffler boiler. Engineering, V. 130, № 3383, p. 632—634, Nov. 14, 1930.
73. Löffler boiler developments. Eng. and boiler house rev. V. 43, № 11, p. 674—675, 1930.
74. Der Löfflerkessel in Ortfesten- und Schiffsanlagen. Zeit. des Bayerischen revisions Vereins, V. 34, № 14, S. 195—200, Juli 1930; № 15, S. 209—213, August 15, 1930.
75. Der Löfflerkessel als Schiffskessel. WRH. S. 327—330, 1931.
76. Developments of the Löffler system of steam raising. Eng-r, V. 148 № 3853. p. 516—517, Nov. 15, 1929.
77. Steam generation at high pressures and temperatures System Loeffler. Power, V. 69, № 12—13, p. 486—489, 524—527, 1929.
78. The Löffler system of high pressure steam generation. Eng-ng. № 3039, p. 473—474, 1925.
79. Флаксерман Ю. Н. Анализ пуска и наладки котлов Леффлера на ТЭЦ ВТИ. Изв. ВТИ. № 5, стр. 1—14, 1934.
80. К пуску первой в СССР ТЭЦ сверхвысокого давления. Изв. ВТИ, № 6 (84), стр. 1—4, 1933.
81. Флаксерман Ю. Н., Берсон С. Я., Панасенко М. Д. Теплоэлектроцентраль сверхвысокого давления. Изв. ВТИ. № 6 (84), стр. 4—24, 1933.

По котлам Шмидта и Гартмана

82. Сборник Hochdruckdampf. Bd. 2 VDI. Verl. G. m. b. H. Berlin, 1929.
83. Hartmann O. H. Entwicklungsmöglichkeit des Höchstdruckdampfes im Schiffsbetrieb. Jahrbuch d. Schiffbautechnischen Gesellschaft, S. 127—161, 1927.
84. Schmidt. Erfahrungen mit dem Schmidt-Hochdruckkessel Hartmann. Wärme, V. 54, № 27, S. 503—511, 1931.
85. Englert F. La chaudière Löffler dans les installations. Génie civil. V. 98. № 23 et 24, p. 568—570, june 6, 1931, et p. 588—592, june 13, 1931.
86. Hartmann O. H. The Schmidt-Hartmann boiler. Power. Vol. 70. № 18. p. 696—697, 1929.
87. Schapiro B. Hochdruckkessel mit mittelbarer Beheizung der Schmidtischen Heissdampfgesellschaft. Feuerungstechnik, № 17, S. 196—198, 1928.
88. Hartmann O. H. Der Schmidt-Hochdrucksicherheitskessel mit mittelbarer Beheizung und seine besondere Eignung für Industriezwecke. Wärme. V. 51, № 4, S. 58—63, 1928.

По прямоточным котлам

89. Flasdieck F. H. Sulzer-Einrohrkessel für Schiffsbetrieb. Die Wärme. № 28. S. 456—457. 1935.
90. Sulzer mono-tube boiler for the „Kertosono". Mar. eng-r. № 690, p. 70—72, 73—74. 1935.
91. High pressure marine boilers. Mar. Eng-r, № 690, p. 73—74, 1935.
92. Македон Ю. Судовой прямоточный котел. Морской сборник, № 8, стр. 106—109, 1935.
93. Бедняков В. А., Мартынов П. Д., Ковальчук М. А. Первые результаты работы опытного советского прямоточного котла в ВТИ. Изв. ВТИ. № 6 (84), стр. 24—28, 1933.
94. Газета Техника за 15/VIII 1935.
95. Газета За индустриализацию, 6/II 1936. Статья проф. Л. К. Рамзина.
96. 15 лет ленинской электрификации. Тепло и Сила, № 12, стр. 1—10, 1935.
97. Münzinger F. Ueber leichte Kessel für schnelle Schiffe. Schiffbau. № 4, 1935.
98. Schulte. Feste Brennstoffe zum Betrieb von Fahrzeugen. Die Wärme, № 8, 1936.
99. New Sulzer high pressure steam generator. Sulzer techn. Rev., № 4, p. 1—6, 1932.
100. Official trials of Sulzer two-drum two-bank boiler for 510-lb. per. Sq. in working pressure. Sulzer Techn. Rev., № 2, p. 12—14, 1932.
101. Remarkable steam generator. Eng-r. V. 154. № 4005, p. 390, Oct. 14, 1932.
102. New high pressure steam generator. Fuel Economist, V. 8, № 88, p. 225—227, Jan. 1933.
103. Sulzer. High pressure boiler plant in new electricity works at Belgrade. Sulzer techn. rev. № 2, p. 1—5, 1933.
104. Stodola A. Sulzer single tube steam generator. Eng-r. V. 156, № 4062 and 4063, p. 496—500. Nov. 17, 1933, and p. 525—527, Nov. 24, 1933.
105. Balmer R. Die Betriebseignung des Sulzer Einrohrkessels. Wärme, V. 57, № 25, S. 339—404, 1934.
106. Sulzer single tube steam generator. Schipbuilder. V. 41, № 295, p. 453—456, 1934.
107. Natural circulation of water in Sulzer super high pressure boilers. Sulzer Techn. Rev. № 3, p. 13—18, 1931.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие конструкций судовых паровых котлов всегда вызывалось быстро растущими требованиями производительных сил общества. Рост последних вызывал количественный и качественный рост парового флота. Повышались требования к быстроходности кораблей, главным образом, за счет уменьшения веса механизмов и котлов и интенсификации их работы. Это заставляло изменять соответствующим образом конструкции судовых котлов. В новых котлах старались не только сохранить лучшие качества ранее существовавших конструкций, но и одновременно вводили различные усовершенствования.

В дальнейшем борьба за снижение себестоимости вырабатываемой энергии пара, а также стремление к большему уменьшению веса и габаритных размеров судовой паросиловой установки, выдвинули новые требования к судовым котлам, а именно повышение давления пара в них, а также увеличение часового съема пара с 1 $м^2$ поверхности нагрева котла. Все это потребовало от металлургии и металлообрабатывающей промышленности усиленной борьбы за улучшение качества выпускаемых котлостроительных материалов (чугуна, меди, железа, огнестойких и нержавеющих сталей). Таким образом, судовое котлостроение явилось одним из крупных факторов технического подъема металлургии и машиностроения.

Для решения задач, поставленных перед судовым котлостроением, мобилизуются и поднимаются на высшую ступень как наука, так и техника. Работы ученых и изобретателей в свою очередь способствуют росту судового котлостроения.

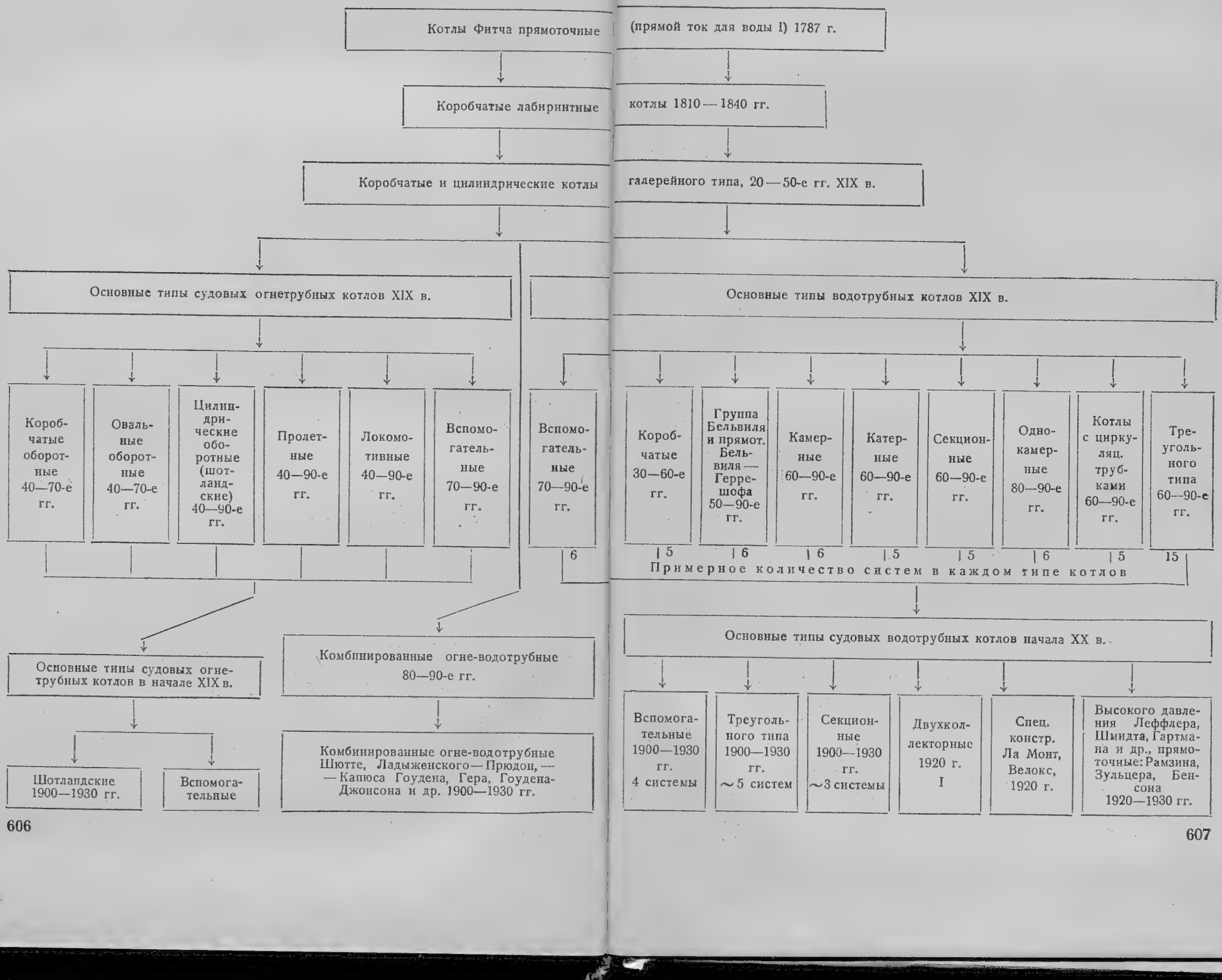
Из приведенной схемы (табл. 160) видно, как под влиянием всех ранее указанных причин появлялись, сменялись и унифицировались различные системы судовых котлов.

Табл. 162 показывает, какие большие успехи достигнуты в области уменьшения габаритных размеров и веса котлов. Табл. 161 показывает рост достижений в области увеличения давления пара, к. п. д. и паронапряжения поверхности нагрева котла. За последние 50 лет удалось уменьшить вес котлов с 8000 *кг* на 1 *т* пара до 1000 *кг/т* пара. Одновременно к. п. д. котлов повысился с 55 до 75—80%, а паронапряжение поверхности нагрева поднялось с 30 до 80 $кг/м^2ч$. Давление же пара повысилось с 2 до 40 *ати*.

Все эти величины в современных водотрубных котлах для данного периода достигли своего предела. Дальнейший рост их ограничивается конструктивными особенностями котлов, а между тем большее повышение давления является очень заманчивым, так как оно позволит вновь повысить мощность и к. п. д. паросиловой установки (табл. 163).

Таблица 160

Схема развития судовых котлов в XIX и в начале XX вв.



Табли

ца 161

№ по пор.	Наименование судов	Класс судов	Система машин и котлов	Год постройки	Давление пара в котле в *ати*	Расход угля на *л. с. ч* *кг/л. с. ч*	К. п. д. котла в %	Паронапряжение пов. нагр. котла в *кг/м²ч*	Весовое напряжение решетки в *кг/м²ч*	Вес котла на 1 *т* производимого пара в *кг/т*	Вес котла на 1 *м²* пов. нагр. котла в *кг/м²*	Примечания
1	Стационарн. . . .	—	Севери	начало 1700 гг.	4—6	80						
2	„	—	Ньюкомен	1 половина XVIII в.	0,1	25						
3	Кронштадтск. док .	—	Смитона	1779	0,1	4						
4	Стационарн. . . .	—	Уатта	Нач. XIX в.	0,1—1	10						
5	„Princeton“	военное	лабиринтн.	1830—1840 гг.	0,91					1 000 *кг л. с.*		Вес котла без воды 1000 *кг/л. с.*
6	„Saranak“	„	галерейн.	1830—1840 гг.	1,0	исп. т. в *кг/кг*	30	12	51	—	—	
7	„Monumental City“ .	коммерч.	коробчат.	1830—1840 гг.	1,05	4,3	55	14,2	49	—	—	
8	„Hermann“	„	огнетр. цил.	1830—1840 гг.	0,84	8	55	20	80	—	—	
9	„Osprey“	„	коробч. водотр.	1830—1840 гг.	1,4	5,5	38	11,4	63	—	—	
10	„Empire State“ . .	речн. коммерч.	галерейн.	1830—1840 гг.	1,75	7	48	16,5	81	—	—	
11	„America“	коммерч.	жаротрубн.	1830—1840 гг.	6,3	5.82	40	45	194	—	—	
12	„Medusa“	корвет	коробчат.	1865	2							
13	„Stein“	крейсер	„	1880	2	4,1	28	25	197	—	—	
14	„Habicht“	„	пролетн.	1879	6	8,5	58	30	160	7100	218	
15	„Sperber“	„	„	1888	7	8,7	60	36,5	128	5300	194	
16	„Wespe“	броненосец	шотландск.	1878	4	8,2	57	28,5	150	6350	177	
17	„Brandenburg“ . . .	„	„	1891	12,0	8,2	57	36,8	150	540	199	
18	„Greif“	„	„	1886	7	8,2	57	22,4	135	7000	200	
19	„Kaiserin Augusta“ .	крейсер	„	1892	12	8,1	56	23,2	135	5700	249	
20	„Brummer“	броненосец	локомотивн.	1883	7	8,1	56	50	110	4350	200	
21	„Comet“	авизо	„	1892	12	8,1	56	28	110	7050	203	
22	„Terrible“	крейсер	Бельвиля	1894	17	5,8	42	25	300	3200	103	
23	„Herreschoff Boot“ .		Геррешоф прямоточный	1878	10.5	5,8	48	45	500	3260	146	
24	„Sainte Barbe“ . .	миноносец	Лаграфеля д'Аллеста	1890	10	7.8	54	29	118	6000	173	
25	„Sheldrake“	канон. лод.	Бабкока и Вилькокса	1890	15	4.37	30	40	112	1000	39	
26	„Monterey“	броненосец	секциональный	1891	11	8,7	60	47,5	223	2680	129	
27	„Friant“	крейсер	Уорда Никлосса	1893	15	9,6	68	27,5	107	4000	110	
28	—	—	Мийабара	1889	14	6,6	45	44	269	1150	50	
29	Фр. мин. № 22 . . .	—	Дю-Тампля	1889	10	8	55	32	118	4600	147	
30	„ „ № 185 . .	—	Нормана	1894	14							
31	„Аскольд“	крейсер	Шульц	1900	15	8	55	32	70	4000	128	
32	—	—	Ярроу	1900	17	9	62	48,5	—	1370	67	
33	„Новик“	миноно с.	з-да Вулкан	1911	17	7,5	52	67,5	360	1160	78	
34	„Лейтенант Ильин“	„	Норман	1916	17,2	8,64	60	38	183	2170	83	По данным Dietrich, Der Moderne Dampfkessel, Rostock, 1908.
35	—	эсминец	„	1924	18	7,25	50	42	342	1390	58,5	
36	—	крейсер	экспресс	1929	20	11,2	76,4	62	—	1060	—	
37	„Viceroy of India“ .	коммерч.	Ярроу 5-коллект.	соврем.	28	11,3	70,8	61	—	—	—	
38	—	крейсер	Ярроу	„	—	—	77	85	—	—	—	
39	„King GeorgeV“ . .	коммерч.	„	1926	38	—	80,3	76,5	—	616	—	
40	„Bremen“	„	треуг. типа с перегревателем	1926	24	—	87	27	—	6120	—	
41	„Brummer“ и „Bremse“	„	Вагнера	1930	45	—	—	82	—	697	57	
42	„Tannenberg“ . . .	„	„	1934	60	—	—	32	—	5200	—	
43	„Potsdam“	„	Бенсона	1934	90			(14,7)[1]				
44	„Conte Rosso“ . . .	„	Леффлера	1935	130	—	—	32 (18,3)	—	4400	—	
45	„Athos“	„	Велокс	1936	50		80	80 (28)	—	700	—	
46	„Bremen“ пароход о-ва „Нептун Ко“ .	„	Ла Монта	1934	13		86	83 (26)	—	1600	—	
47	Стационарный . . .	—	Рамзина[2]	1933	130		80	82 (47)	—	1800—2100	—	
							80	135 (18,5)	—	2950		
							92	460 (120)	—	1400		
							78	48	—	2109		
							85	68,5 (86)[3]	—	617		

[1] Во всех посл. котлах, кроме котла Рамзина, в скобках приводятся данные $\frac{D}{H_{к+эк+пе}}$.

[2] Вместо $\frac{D}{H_к}$ взято $\frac{D}{H_{к+эк+Iпе+IIпе}}$. В скобках дана на проекцию $\frac{D}{H_{к+эк+Iпе+IIпе}}$ при D_{max}

[2] По данным Рамзина, газ. „Техника“ 15/VIII 1935 г.

Таблица 162

№ по пор.	Наименование судна	Класс судна	Год постройки	Система котлов	Число котлов	Суммарная мощность котельных в *л. с.*	Суммарная паропроизводительность котельных в *т*	Суммарная площадь котельных в $м^2$	Отношение мощности котельных к их площади в $л.с./м^2$	Отношение площади котельных к суммарной паропроизводительности в $м^2/т$
1	„Kaiserin Augusta"	крейсер	1892	двойной шотландск.	8	14 015	91 000	488,4	28,7	5,5
2	„Wört"	броненосец	1892	ординарный шотландск.	12	10 228	66 000	350,5	29,2	5,3
3	„Hohenzollern" . .	императорская яхта	1892	двойной и ординарный шотландск.	по 4	9 635	62 500	418	23	6,7
4	„Beowulf"	броненосец	1890	локомотивн.	4	4 866	38 800	159,4	30,5	4,1
5	„Satellit"	крейсер	1893	„	4	4 792	38 000	84	57,0	2,2
6	„Казарский" . . .	„	1889	„	2	3 500	28 000	50	70	1,8
7	„Alger"	авизо	1889	Бельвиля	24	5 089	41 000	244	20,8	6,0
8	„Latouche Tréville"	крейсер	1892	„	16	7 300	58 000	208	35	3,6
9	„Charlemagne" . .	броненосец	1895	„	20	14 500	116 000	329,5	44	3,8
10	„Friant"	крейсер	1893	Никлосса	20	9 438	75 500	285	33	3,8
11	„Speedy"	миноносец	1892	Торникрофта	8	4 703	38 000	119	39,5	3,1
12	„Fei Ying"	—	—	Ярроу	8	5 000	40 000	100	50	2,5
13	„Monterey" . . .	броненосец	1891	Уорда шотландский	4 и 2	5 244	42	143	35,6	3,4
14	Амер. миноносцы	—	—	Мошера	2	2 000	16	42,6	47	2,7
15	„Rajputana" . . .	коммерческое	современ.	шотландск.	6	—	—	450	—	4,3
16	"Statendane" . . .	„	„	B и W	6	—	—	398	—	4,18
17	„Bremen"	„	1926	треуг. типа с перегревателями	20	—	—	254	—	3,84
18	„Empress of Japan"	„	современ.	Ярроу	6	—	—	398	—	4,3
19	„Viceroy of India"	„	„	„	6	—	—	348	—	3,33
20	—	крейсер	„	„	6	—	—	325	—	0,58
21	—	эсминец	„	„	3	—	—	148	—	0,85

Таблица 163

№ по пор.	Наименование	Давление пара в *ати*		
		20	30	130
1	Температура пара в °Ц	320	425	480
2	Температура питательной воды	190	190	190
3	Вакуум в долях *ат*	0,965	0,965	0,965
4	Термический к. п. д. установки в % . .	39	44	50,8
5	При этих условиях 1 *т* пара может произвести на клеммах генератора энергии в *квт-ч*	194,7	232,79	294,4

Поэтому большая исследовательская работа по применению на судах пара высокого давления и высокого перегрева ведется одновременно с дальнейшей работой по усовершенствованию существующих огнетрубных и водотрубных котлов.

В огнетрубных котлах газовые коробки переносятся из корпуса котла наружу, применяется перегрев пара, вводится подогрев воздуха или питательной воды теплотой уходящих газов. Делаются небезуспешные попытки повысить к. п. д. котла до 100% и выше, считая по низшей теплотворной способности топлива (котлы Гоуден — Джонсона).

В водотрубных котлах стенки топки покрывают экраном, что значительно повышает паропроизводительность котла и тепловое напряжение топочного пространства, а также увеличивает срок службы кожуха и обмуровки топки.

Наряду с этим проводится большая работа по механизации обслуживания и управления котлов. Ручные топки сменяются механическими, пылеугольными и нефтяными. Начинает широко применяться автоматизация управления котлами. В настоящее время по заказу котлостроительных заводов промышленность разрабатывает и осваивает производство для судовых котлов измерительных приборов, автоматических регуляторов горения и парообразования в котле.

Все это подготовило почву и дало возможность к 1924 г. сделать большой скачок в повышении давления пара с 20 до 225 *ати* во вновь появившихся котлах Бенсона. Парообразование в котле Бенсона коренным образом отличается от парообразования в котлах нормальных конструкций. Скрытая теплота парообразования в котле Бенсона при давлении пара в 225 *ата* равна нулю.

Следовательно, бесчисленное количество изменений судовых котлов на определенной ступени развития их привело к появлению котлов высокого давления уже совершенно иного качества.

После появления котла высокого давления системы Бенсона, сконструировано несколько систем котлов высокого давления Шмидта, Гартмана и др., прямоточных системы Рамзина, Зульцера и др. и специальных конструкций Ла Монта, Велокса.

Каждая из упомянутых систем уже успела пережить большое число изменений, ведущих к повышению к. п. д. и надежности работы.

Появление и развитие современных котлов Бенсона и Рамзина ведет по сути дела к замене ими огнетрубных и водотрубных котлов, т. е. тех самых систем, которыми раньше заменялись прямоточные котлы Фитча (1787—88 г.), Бельвиля (средина XIX в.), Геррешофа, 1876 г. и др. Котлы как Бенсона, так и Рамзина воспроизводят прямоточный принцип работы на основе более высокой котельной техники.

Освоение производства и эксплоатации прямоточных котлов высокого давления обещает разрешить основные противоречия между требованиями, предъявляемыми к судовым котлам быстро растущим флотом, и теми возможностями, которые могли дать котлы нормальных конструкций. При применении последних попытки повысить к. п. д. паросиловой установки за счет повышения давления пара вызывали одновременное увеличение веса установки, что было весьма нежелательным, а в ряде случаев даже неприемлемым для судовых установок.

Таким образом, производство и эксплоатация прямоточных котлов дают широкую перспективу развитию парового флота в области значительного повышения к. п. д. паросиловой установки с одновременным уменьшением веса и габаритных размеров котлов и механизмов.

Однако, несмотря на большие преимущества котлов высокого давления и специальных конструкций, на судах флотов капиталистических держав они получают весьма ограниченное распространение. Основная причина этого заложена в резком сужении капиталовложений в производство в связи с кризисами и последующими депрессиями. Противоречия капиталистического общества не стимулируют создания базы для введения новейших усовершенствований.

Совсем иначе обстоит дело с применением пара высокого давления как в стационарных, так и в судовых установках СССР. Применение пара высокого давления и высокого перегрева ставит СССР в деле котлостроения на уровень и даже выше технических достижений передовых капиталистических стран.

В условиях социалистического общества открыты неограниченные возможности для дальнейшего усовершенствования судовых паросиловых установок на базе общего подъема народного хозяйства и завершения технической реконструкции его. Новое социалистическое отношение к труду — стахановское движение — является залогом, что эти возможности будут полностью использованы для неуклонного подъема нашего народного хозяйства, для укрепления обороноспособности нашей страны.

ПРЕДМЕТНЫЙ И ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛИ

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автоматический регулятор питания 30, 175, 178
Автоматы питательной системы 532
Автомобиль паровой 94
Аккумулирующая способность котлов 33, 71
Аппарат (фонтан) Соломона де Ко 15
Аппарат Фута 327
Арматура котла 16
Асбестовая прокладка 133
Атмосферная машина 22

Балласт топлива 52
Бандаж трубок паровое 207
Болтовые связи 129, 200
Борьба английских промышленников 289
Борьба за распространение котлов 160
Бункера 462

Вентиляторное дутье под решетку 102
Вес котлов и машин 23
Вес судовых котлов 48, 184, 188
Весовое напряжение решетки 81
Верхнее продувание котла 56
Взрывы летучих веществ 323
Взрывы котлов 55
Взрывы котлов — предотвращение 59
Взрывное горение нефти в топке 540
Влажный пар 33
Вода — вскипание 66, 188, 264
Вода в топливе 53
Вода речная 54
Вода морская 57
Вода речная — жесткость 54
Вода — соленость 57
Вода — сопротивление движению 220
Водомерные стекла 30
Водоуказательные трубки 20, 22, 23
Водотрубные котлы — характеристика 73, 308
Водяные камеры 198, 200, 229
Водяное пространство котла 29
Водяное уплотнение 535
Водяные экономайзеры 21, 36, 182, 192, 221
Водяной экономайзер Грина 111
Водяной экономайзер игольчатый 537
Водяной экономайзер Кемпа 111
Водяной экономайзер кипящий 21
Водяной экономайзер Северн 21
Водяной экономайзер Эвенса 36
Водяной объем котла 72, 191, 201
Воздух вторичный 455
Воздух — подвод в слой топлива 53
Воздух — коэфициент избытка 50
Воздухонаправляющее устройство топок 343
Воздух — подогрев по системе Патина 20
Воздушное охлаждение кожуха 293
Воздухоподогреватели 107
Воздухоподогреватель Вилля 110
Воздухоподогреватель Гоудена 108
Воздухоподогревателей конструкции 108—110
Воздухоподогреватели трубчатые 108
Воздухоподогреватель Юнгстрема 418, 565
Воздуходувки 180, 539
Воздушный клапан Уатта 31
Воздушный компрессор 342
Волнистые коллекторы 217
Волнистые крышки 215
Воспламенение летучих 428
Воспламенение нефти 336
Вскипание воды в котле 66, 188, 264
Вспомогательные котлы 304, 341
Вторичный воздух 455
Выпадение накипеобразователей 588
Высокое давление пара 31, 131
Высокий перегрев пара 593
Высокое давление — котлы 35
Высота топки 186, 271

Габаритные размеры котла Смитона 23
Габаритные размеры судовых котлов 48
Газовая коробка выносная 151
Газовая коробка — удлинение 141
Газовая коробка 118, 129, 154
Газовая топка Фута 327
Газовые каналы зигзагообразные 65
Газонепроницаемая трубчатая перегородка 233, 254, 261
Газоохладитель 418
Газоходы в котле Нормана 261
Газоходы прямоугольного сечения 24, 49, 61

Газоходы 61
Газы — скорость 539
Газы — сопротивление движению 71
Гальванический ток и его действие на стенки котла 116
Галерейные котлы 62—66
Генератор шлаковый 442
Гидравлические испытания котлов 130
Гидравлические сопротивления 252
Гидравлические сопротивления в котле Ла Монта 535
Гидравлические удары 22
Гладкая топка 135
Горелка пылеугольная Вудсона 465
Горелка пылеугольная Пибоди 455
Горение угля в слое 428, 429
Горение угольной пыли в камере 447, 456
Горение — химическая неполнота 50
Градусы Брандта 57
Градусы жесткости 54
Грузоподъемность пароходов — полезная 48
Грязевик 175, 192

Давление пара в котле Папина (80—100 *ат*) 18
Давление пара в котле Уатта 31
Давление пара в котле Эвенса 36
Давление пара в котле 57, 186
Давление пара высокое 131
Давление пара повышенное 58
Дверцы топочные 157
Двигатель Бранка 16
Двигатель водяной 26
Двигатели ветряные 27
Двойные шотландские котлы 136
Деаэрация воды 221
Дежектор 175
Деревянные котлы 34
Действие электролитов на стенки котла 116
Детандер 186
Деформация в огнетрубных котлах 141
Диаметр кипятильных трубок 368
Деформация — измерение 378
Доски трубные в галерейных котлах 65
Доски трубные в локомотивных котлах 158
Древесное топливо 51
Дроссельные шайбы 534
Дутье вентиляторное 86
Дутье в закрытый зольник 100
Дутье в зольник 103
Дутье нижнее 74
Дутье Унльянса 102
Дутье Фотергиля 102
Дутье в закрытую котельную 96
Дутье паровое 13, 92
Дымовая труба кирпичная 48
Дымовая коробка 68, 128
Дымогарные трубки — сплющивание 73
Дымогарные трубки 68, 73, 116, 138, 153
Дымогарные трубки — заглушение 133
Дымогарные трубы 31
Дымообразование — приспособления для уменьшения 359
Дымосос 94
Дырчатые колпачки 534

Естественная тяга 91

Жаровая труба 36
Железные дороги 70
Желобчатые колосники 324
Жесткость конструкций котлов 66, 215, 227
Жесткость речной воды 54
Жидкое шлакоудаление 466

Забортная вода для питания котлов 54
Заглушение дымогарных трубок 133
Заклепочный шов 119, 158
Закрепление кипятильных трубок 198, 223, 277
Замена кипятильных трубок 249, 273, 282, 286
Замена угольного отопления нефтяным 317
Затылочное расположение трубок 138
Защита боковых стенок кожуха 281
Защитные наконечники 141
Звездочка 428
Землечерпалка Басюр де Басе 467
Зеркало испарения 29, 66
Зола в топливе 53

Игольчатый экономайзер 537
Изоляция кожухов и машин 26
Измененне судовых котлов 605
Инжекционный холодильник 115
Инерция тепловая 447
Индивидуальная система пылесжигания 460
Интенсивность работы судовых котлов 86
Искусственный кир 320
Искусственная тяга 92
Искусственная циркуляция 536
Испарительность нефти 340
Исследование месторождения 320
История нефтяного отопления 319, 336
Испарители 340
Использование энергии пара — первые попытки 13
История холодильников 115

Кадры — их подготовка 59
Каменные котлы 34
Камера водяная 198, 229
Камера щелевая 215
Камерные котлы 194—209
Катеры минные 209
Катерные котлы 209
Крэкинг — процесс 331
Кильватерные колонны 347
Кир искусственный 320
Кипятильные трубки 73, 171, 219, 248, 253, 264, 277, 367, 368
Кипятильные трубки, уменьшение их диаметра 368
Кипятильные трубки — диаметр 367

Кипятильные трубки — замена 249, 273, 276, 282, 286
Кипятильных трубок постановка 286
Кипятильных трубок закрепление 198, 223, 277
Кирпичная кладка топки 214
Кирпичная дымовая труба 48
Кирпичная обмуровка котла 48
Кирпичная кладка 214
Клапан предохранительный 18
К. п. д. котла выше 100% 418
Кожух 171
Коллекторы разъемные 284, 286
Коллекторы волнистые 217
Коллекторы цельнотянутые 374
Колосники опрокидные 488
Колосники желобчатые 324
Колпачки дырчатые 534
Колониальные интересы Франции 172
Колосниковая решетка 154, 159
Колосниковая топка Вагенкнехта 325
Каменный уголь 52
Компактность котельной 65
Комбинированные котлы 295—297, 408—417
Кольцевая система пылесжигания 462
Конвекционная и радиационная поверхность нагрева 29
Конденсатор 115
Конструкция пароперегревателей 88—90, 404—408
Компрессор воздушный 342
Каналы газовые зигзагообразные 65
Конические трубки 204
Конструкции котла — жесткость 66, 215, 227
Конструкция воздухоподогревателей 108—110, 418—565
Контроль за температурой уходящих газов 50
Корень факела — подвод воздуха 331
Коридоры трубные 138
Коробчатые котлы 66
Коробка газовая 118, 124, 154
Коробка дымовая 68, 128
Коробки соединительные чугунные 173
Коррозия металла 171
Коррозия кипятильных трубок 171, 213
К. п. д. котла Соломона де Ко 16
К. п. д. судовых котлов 49
К. п. д. котлов — повышение до 90% 515
К. п. д. котельных установок — понижение 56
К. п. д. судовых паросиловых установок 609
Коэфициент избытка воздуха 50
Коэфициент теплопроводности 55
Котельной площадь 610
Котлы, простота и надежность работы их 60
Котлостроение — покровительство отечественному котлостроению 173, 199
Котлостроительный материал 22, 61, 62, 64, 130, 153, 156, 157
Кронштадтская машина Смитона 23
Крышки коллекторов волнистые 215
Котлов взрывы 18, 20, 21
Котлы:
Аллера 65
Альбана 197
Альми 195
Андерсона Лойола 295
Авизо Zieten 152
Атмосферных машин 22
Бабкока и Вилькокса 217, 400, 504
Бабкока и Вилькокса типа SX 506
Барлоу 39
Типа Бельвиля 169—197
Бельвиля 169, 395
Бельвиля прямоточные 170
Бельвиля — Долголенко 398
Долголенко 396
Бенсона 552
Блекея 37
Блекиндена 273, 298
Бойера 225
Типа Бремен 498
Вагнера 513
Вальтера 240
Высокого давления 35, 76, 531
Водотрубные 14, 38, 73, 163
Велокса 539
Вилькокса Стефана 217
Вулкан для эсминца «Новик» 375
Вспомогательные 298—308
Галерейного типа 62
Гартмана 574
Гейне 199
Гейторна 223
Гера 416
Германского адмиралтейства 386
Герни 250
Герона 13
Геррешофа прямоточный 189
Геррешофа 190
Гольца локомотивный 210
Гольца водотрубный 211
Гоудена 416
Гоудена — Джонсона 417
Гюйо 254
Гестуса 301
Джонсона 503
Джоли 168
Дюна, Бутона, Трепарду 214
Дю-Тампля 251
Дю-Тампля — Гюйо 394
Джебиз Кони 62
Котлы для быстроходных дирижаблей 521
Добла прямоточный 592
Долголенко 396
Дюра 242
Деревянные 34
Донхэм 68
Котлы для самолета 253, 589
Котлы жаротрубные 14, 37, 76
Зульцера 590
Каменные 34
Камерные 194—209
Комбинированные 295—297, 408—417
Катерные, на быстроходном катере 517, 592
Катерные пролетные 209
Кларка и Чэпмэна 306
Кларксона 307

Колле 244
Кольтмана 298
Коломбиера 301
Корнвалийский 37
Конзея 373
Коульса 282
Коульса с перегревателем 285
Кохрана 304
Крейсера Фальке 154
Крейсера «Surprise» 153
Крупна 307
Коробчатые 66, 116
Китайского миноносца 157
Лабиринтные котлы 60
Лаграфеля д'Алеста 203
Ла Монта 531
Ленца 278
Леффлера 563
Локомотивные 70, 156
Ладыженского 414
Марстона 303
Мемфорда 233
Мийабара 248
Мийабара двойные 249
Мартина 76
Мэрика и сына 73
Мэрика Тауна 60, 63, 64
Мерри и Хезтхорста 68
Морриса 66, 71
Мот и Эрриза 70
Мокродонные коробчатые котлы 118
Мокродонные локомотивные котлы 158
Мошера катерные 270
Мошера 228, 269, 384
Мошера двухколлекторные 271
Миноноски кл. Шютце 156
Наперсткообразные 14, 307
Никлосса 245
Никлосса начала XX в. 399
Нормана 257
Нормана Сигоди 261
Нормана начала XX в. 387
Низкие коробчатые 116
Ножные коробчатые 128
Ньюкомена 22
Однокамерные 227—248
Овальные 129
Огнетрубные 32, 72, 161—163, 402
Огнетрубные катерные 209
Ориоля 201
Папина 17
Папина с жаровой трубой судовые 20
Паровозные 71
Пенелля 212
Перкинса 187
Петерсона — Макдональда 290
Плоскодонные коробчатые 118
Пти и Годара 227
Пролетные 152—156
Прюдон-Капюса 408
Прямоточные 37, 170, 189, 552, 572, 590, 592
Рамзина прямоточные 577
Рамзина 577—590
Ребристые 513
Рида 276
Робертса 194
Рини Нифай 74
Сампсона 232
Северн 20
Ситона 215
Смитона 23
Солнани 152
Солиньяка Гриня 226
Сошэ 251
Стирлинга 292
Секционные 215—226
Стефенсона паровозный 71
Стивенса 39
Соломона де Ко 16
Стэкгауза и Томлинсона 63
Стивенса 39
Судостроительного общества в Фленсбурге 305
Специальных конструкций 531
Торникрофта-Маршалла 229
Торникрофта-Шульца 263, 374, 462, 485
Тоуна 213
Треугольного типа 250—292
Тривитика 71
Уатта 29
Уайта 281
Уайта—Форстера 282, 383
Уорда 235, 272
Уорда катерные 235
Уорда секционные 237
Уорда треугольного типа 272
Утилизационные 307
Файерфильда 306
Фильда 168
Филиппса 289
Фитча 37
Флеминга и Фюргиссона 275
Цилиндрические оборотные 70, 14
Шарля Бабиш 297
Шихау 76
Шмидта 572
Штейн Мюллера 207
Штромана 296
Шухова 303
Шотландские ординарные и двойные 131—150
Шютте 413
Эвенса 35
Эльдера 536
Ярроу камерные 209
Ярроу треугольного типа 284, 368, 373, 482, 485, 495
Краники пробные 20, 23
Кран продувания 56
Красная медь 156
Кратность циркуляции 203
Крепление трубок в камерах 198, 223, 277
Крепление крышек коллекторов 371
Крепление трубок в коллекторе 379
Крепление пароперегревателя 499

Лабиринтовые котлы 60
Лаз в газовую коробку 154
Летучих веществ взрывы 323
Летучих веществ воспламенение 428
Локомотивные котлы 70

Мазут 321
Мазута удельный вес 321
Манометр Уатта 30
Максимальная паропроизводительность 581
Материалы смазочные 402
Материал котлостроительный 22, 61, 62, 64, 130, 153, 156, 157
Массивные чугунные ящики 323
Машина паровая Смитона 23
Машина паровая Уатта 26—28
Машина Альбана 58
Мельница угольная Кеннеди 454
Мельница угольная системы Резолютор 463
Мельница угольная Тодда 462
Мельница угольная Фулер Легай 471
Медные прокладки 213
Метательные топки 428
Механический недожог нефти 326
Механические топки 426
Механической топки процесс горения 428—443
Механизация управления котлов 588
Минные катеры 209
Мокродонные котлы 118
Молот паровой 28
Манометр U-образный 30
Морская вода 57

Назначение вспомогательных котлов 298
Наивыгоднейшее давление пара 517
Накипь 54
Накипеобразование 54, 139, 176
Наконечник сопловой 332
Наконечники защитные 141
Наперсткообразные трубки 307
Наперсткообразные котлы 307
Насос питательный 586
Насос циркуляционный 536
Научные работы по теплопередаче 368
Невозвратный клапан 170
Недостатки механических топок 445
Недостатки смешанного отопления 357
Неравномерная паропроизводительность трубок 391
Нефть 321
Нефть — исследование месторождений 320
Нефть — история нефтяного отопления 319, 336
Нефть — процесс горения 331
Нефтефильтрование 365
Нефтесжигание — принципы Пашкина 337
Нефтяное отопление — преимущества 318
Нефтяной насос 386
Нижнее продувание 56
Никелевая сталь 161
Низкие коробчатые котлы 116
Ножные коробчатые котлы 128

Обдувка паром 74, 176, 200
Обмуровка по способу Детрика 501
Обмуровка котла 227
Обслуживание топки 318
Объемы котлов 79, 191, 201
Овальные котлы 129
Овальная форма котла 129
Огнетрубные котлы 32, 161
Огнетрубные котлы — циркуляция 137, 158
Огнеупорный кирпич 381, 518
Огнестойкие стали для опор перегревателей 493
Однокамерные котлы 227
Одноретортная топка 437
Опрокидные колосники 488
Опыты по воспламенению нефти 336
Опыты по нефтяному отоплению 344
Опыты Никольсона по теплопередаче 539
Опыты по пылеугольному отоплению 471
Опыты по пылеугольному отоплению Кларка, Чэпмэна и К° 449
Опыты американского государственного управления судоходства 452
Опыты по сжиганию углей Г. О. и Т. 476
Опыты Маршалла 96, 157
Осушение пара 69, 87
Осушение пара механическое 543
Отказ от подогрева нефти 337
Отказ от перегрева пара 91
Отопление пылеугольное 447
Отопление смешанное 356
Охлаждение кожуха воздушное 293
Оцинкованная сталь 264
Очистка поверхностей нагрева 33, 54, 61, 63, 176, 192, 200, 206, 207, 215

Падение паропроизводительности во время чистки топки 53
Паровая пушка 14
Паропроизводительность локомотивных и пролетных котлов 157
Паропроизводительность максимальная 581
Паропроизводительность труб неравномерная 391
Паропроизводительность — повышение 58
Пароприемная труба 74
Паровые машины 83
Паросборник 215
Паровой молот 28
Паровой коллектор 201, 232
Паровое банение трубок 207
Пароводяное сопротивление движению 219
Паровое пространство котла 29
Паровозные котлы 71, 72
Паровой форсун 92
Паросъем часовой 372
Паронапряжение поверхности нагрева 62
Паронапряжение рекордное 65
Паронапряжение в котле Велокса 541
Паровое дутье Герона Александрийского 14

Пароперегреватель в пучке трубок 489
Пароперегреватель вертикальный 88
Пароперегреватель горизонтальный 88
Пароперегреватели 87, 90, 194
Пароперегреватель Гирна 87
Пароперегреватель Шмидта 405
Пароперегреватель Бютнера 404
Пароперегреватель Пилока 407
Пароперегреватель в хвосте котла 488
Пароперегреватель — крепление 499
Пароперегреватель — предохранение от пережога 489
Пар высокого давления 131
Пар влажный 33
Пара сепаратор 170, 190, 184
Паровой и парусный флот 40, 47, 85
Пароосушительные приборы 87
Паровое пространство котла 151
Паровые форсунки 331
Пароходы — статистика 40, 47
Пароход Атос 551
Пароход Бремен общества Нептун 502
Пароход Бласко де Гарай 15
Пароход Берда 48
Пароход Бремен 497
Пароход линии Граце 502
Пароход Кертозо 590
Пароход Клермонт 39, 48
Пароход Конте Россо 570
Пароходы первые 39
Пароход Потсдама 557
Пароход Ридемана 532
Пароход Штасфурта 531
Пароход Уккермана 553
Пароход Фитча 37
Пароход Фультона 39
Пароход Хунгария 298
Перегородки трубные 233, 254
Перегрев пара регулирование 9, 586, 591
Переделка топок под смешанное отопление 356
Перерасход топлива 55
Перспектива применения пара высокого давления 593
Перегрев трубок 493
Перспективы применения пара высокого давления на судах 593
Перегородка — газонепроницаемая трубчатая 233, 254, 261
Питание котлов забортной водой 54
Питание котлов в водяные коллекторы 286
Питательный насос 586
Питание экрана вручную 532
Пластинки цинковые для котлов 116
Плоские стенки котла 129
Площади, занимаемые котельными 178
Поверхность нагрева котла 29
Поверхность нагрева — конвекционная 29
Поверхность нагрева — радиационная 29
Повышенное давление пара 57, 86
Поверхностные холодильники 115
Поверхность нагрева экранированная 171
Повышение к. п. д. паросиловой установки 49
Поворот котла на 90° 226
Подвод воздуха к корню факела 331
Подвод воздуха в слой 53
Подготовка кадров 59
Подогреватели нефти 365
Подогрев воздуха 108
Подогрев воздуха по системе Папина 20
Подсушка топлива 19
Постановка кипятильных трубок 286
Полезная грузоподъемность 48
Понятие пара высокого давления 547
Преимущества нефтяного отопления 317
Преимущества пылеугольного отопления 447
Предотвращение взрыва котла 59
Предохранительный клапан Папина 18
Предохранительный клапан в топке 323
Предохранение перегревателей от пережога 489
Предтопок 354
Приборы пароосушительные 87
Приспособление для уменьшения дымообразования 359
Принципы нефтесжигания на судах 464
Применение пара повышенного давления 86
Применение перегретого пара 87
Принципы нефтесжигания Пашнина 337
Применение высокого перегрева пара 593
Пороги топочные 61, 148
Пробные краники 20, 23
Прогибание трубок перегревателя 493
Продувательные краники 56
Продувание котла нижнее 56
Продувание котла верхнее 56
Продувание трубок 247
Продувка котла Ла Монта 536
Пролетные котлы 152
Пространство водяное 29
Пространство паровое 151
Простота и надежность работы котла 60
Процесс горения угля в слое 428, 429
Процесс горения угольной пыли в камере 447, 456
Процесс горения угля в механической топке 428—443
Процесс горения мазута 331
Процесс горения в топке Тейлора 440
Пробки бронзовые 274
Прокладка из медного кольца 213
Прокладка асбестовая 133
Промышленный котел Рамзина 581
Проточные котлы 37, 170, 189, 552, 572, 590, 592
Прямоугольное сечение дымогарных труб 24, 49, 61
Пульверизация механическая 342
Пульверизаторы Шпаковского 329

Пульверизаторы Эйдона 329
Пульверизатор второй Шпаковского 330
Пушка паровая 14
Пылеугольное отопление 447
Пылеугольное отопление водотрубных котлов 468
Пылеугольное отопление в капиталистических странах 475
Пылеугольное отопление в СССР 474

Развальцовка труб под косым углом 285
Развальцовка — замена сваркой 147
Разводка котла 186, 252, 285
Разводка паров в котле Смитона 23
Разводка паров в котле Шютте 414
Разводка паров в огнетрубных котлах 73, 74
Развитие военного флота Америки 217
Развитие германского флота 199
Разъемные коллекторы 286
Размеры котла и их изменение 23
Расположение трубок и затылок 138
Распространение котлов Шмидта 573
Распространение топок Тейлора 444
Рационализация капиталистического производства 547
Реакции окислительные 331
Ребристые котлы 513
Регулятор питания воды 30
Регулятор давления пара в котле 587
Регулировка подачи нефти 586
Регуляторы питания системы 30, 175, 178
Регулирование температуры пара 90, 586, 591
Редукционный клапан 186
Рекордное паронапряжение 65
Ремонт котла 62, 65, 69, 177
Решетка цепная 426
Решетка Фернандо 103
Ротор 464
Рост японского флота 248
Речная вода 54
Ручное питание экрана 532

Самовозгорание топлива 53
Самолетные котлы 253, 589
Свинцовые предохранительные пробки 175
Сверхприбыли 160
Своды 118, 153, 154
Связи болтовые 129, 200
Связи прутковые 64
Секционные котлы 215
Секции котла 217, 232
Сепаратор пара 170, 184, 190
Сепаратор центробежный 543
Специальных конструкций котлы 531
Синяя книга 115
Скорость газов 539
Смазочные материалы 402
Смешанное отопление и его недостаки 357
Смесь пароводяная 219
Современные судовые котлы 481
Соленость воды для питания котлов 57
Солености градусы 57
Сопловой наконечник 332
Сопротивление движению пароводяной смеси 219
Сопротивление (гидравлическое) движению воды 220
Сопротивление движению газов 64, 76
Сплющивание дымогарных трубок 73
Сплющивание топок 135
Способ крепления трубок 379
Сталь 84, 130
Сталь никелевая 161
Сталь оцинкованная 264
Стандартизация элементов котла 186, 232, 368
Статистика пароходов к началу XIX в. 40, 47
Стенки котла, температура их 55
Стенки котла — перегрев 55
Стенки котла — плоские 129
Стекла водомерные 30, 518
Струйчатая топка Эдоуна 324
Судовые котлы, вес, характеристики 608
Судовые котлы — современные 481
Сундучные котлы 29
Сухопарник 74, 150

Температура уходящих газов 50
Температура топки, ее понижение 531
Температура стенки котла 56, 157
Тепло уходящих газов 49, 182
Тепловые потери с уходящими газами 50
Тепловые потери в окружающую среду и меры борьбы с ними 51
Тепловые потери от химической неполноты горения 50
Тепловые потери с продуваемой водой 56
Теплопередача 368, 384
Тепловосприятие 118
Теплопроводность (коэфициенты) 55
Тепловая инерция 447
Течи 23, 74, 186, 209
Течи в трубных досках 118, 146, 153, 158
Течи в местах развальцовки 76
Топки 77, 154
Топка Адамсона 319
Топка Бурна 19
Топка Бениса (переталкивающая) 429
Топка Брунтона 426
Топки Бидля 322
Топка колосниковая Вагенкнехта 325
Топка для взрывного горения нефти 541
Топка Девиля 324
Топка Дреземейера 337
Топка с нижней подачей Джукса 426
Топка с нижней подачей Джонса 427
Топка — цепная решетка Джукса 426
Топка нефтяная системы Вулкан 376
Топка Моррисона 149
Топка Папина 19
Топка Пашнина 337
Топка Первеса 148

Топка Ричардсона 326
Топка Тейлора, процесс горения в ней 446
Топка Шоу и Линтона 323
Топка Шенсновича—Петрашевича 338
Топка струйчатая Эдоуна 324
Топка Фута газовая 327
Топка Фокса 139, 160
Топка Фрисби 427
Топка Холла 427
Топка гладкая 135
Топки огнетрубных котлов 118
Топка метательная 428
Топки механические 426
Топка переталкивающая 429
Топка одноретортная 437
Топка с нижней подачей 436
Топка шахтная 426
Тяга в топке 118
Топки — высота 186, 271
Топки — кирпичная кладка 380
Топочные дверцы 157
Топочные пороги 61, 148
Топки — воздухонаправляющее устройство 343
Топки — предохранительный клапан в них 323
Топливо — самовозгорание 53
Топливо — требования к нему 51
Топливо — перерасход 55
Топливо — подсушка 19
Топливо древесное 19
Топливо — уголь 19
Транспорт — развитие 44
Требования к двигателю 27
Треугольного типа котлы 250—292
Трубки водоуказательные 20, 22
Трубки циркуляционные 168, 240, 246
Трубки кипятильные 73, 171, 174, 219, 248, 253, 264, 277, 367
Трубные коридоры 138
Трубные перегородки 233, 254, 261
Труба пароприемная 74
Трубки перегревателей — прогибание 493
Трубы прямоугольного сечения 24, 49, 61
Трубки — способ крепления их 147
Трубные доски 68, 146
Трубные доски в галерейных котлах 65
Трубные доски в локомотивных котлах 158
Трубные доски — течи в них 118, 146, 153, 158
Трубки наперстковообразные 307
Трубки конические 204
Трубки — перегрев 493
Трубные решетки — зашлаковывание 158
Трубки дымогарные 32, 68
Трубы дымогарные 31
Турбина Бранка 17
Тяга естественная 91
Тяга искусственная — характеристика 103
Тяга посредством дымососа 94
Тяга непрямого действия 95
Уголь каменный 52
Удары гидравлические 22
Удельный вес мазута 334, 388
Улучшение производства котлов и топок 160
Улучшения в производстве железных листов 64
Уменьшение гидравлических сопротивлений 398
Универсальный двигатель Уатта 26
Уплотнение водяное в циркуляционном насосе 535
Уровень воды 23, 158, 171, 186
Установка пылеугольная 459
Условия надежной работы прямоточных котлов 552
Утилизационный котел 307
Уходящие газы — температура 50
Уходящие газы — тепло 49

Фильтрование нефти 365
Фланцевые соединения топки 146
Флот паровой и парусный 40, 47, 85
Форсировка работы котла 86
Форсунка Бенкстона 334
Форсунка Бюреля 336
Форсунка воздушная Дженсона 340
Форсунка вращающаяся Рея 361
Форсунка зажигательная 456
Форсунка Калашникова 343
Форсунка Кертинга 343
Форсунки круглые 360
Форсунка Ленца 331
Форсунка механическая 342
Форсунка паровая 331
Форсунка Сандгрена 335
Форсунка Торникрофта 360
Форсунка Шпаковского 329
Форсунка Шухова 360
Форсунки щелевые 334
Форсунка Эйдона 329
Форсунка Янушевского 348
Франция: колониальные интересы 172
Фурмы 322

Характеристики искусственной тяги 103
Характеристики судовых котлов 605
Характеристика водотрубных котлов 308
Химическая неполнота горения 50
Хлопок 47
Холодильники инжекционные 115
Холодильники поверхностные 115
Холодильники исследования 116

Цельнотянутые коллекторы 374
Центробежный сепаратор пара 543
Цепная решетка 426, 433
Центральная система пылесжигания 459
Цилиндрические камеры щелевые 215
Цилиндрическая форма котла 65
Цилиндрические котлы 70
Цинковые пластинки для котлов 116
Циркуляция воды в огнетрубных котлах 137, 158

Циркуляция воды 168, 180, 186, 195, 198, 203, 220, 230, 235, 238, 246, 249, 252, 264, 294
Циркуляция — улучшение 197, 215
Циркуляционный насос 536
Циркуляционные трубы 158, 175, 250
Циркуляционные трубки 168

Часовой паросъем 372
Чистка топок 53, 130
Чугун — производство 46
Чувствительность котла Шмидта 572

Шатунный механизм Уатта 26
Шахтная топка 426
Шахта для входа в котельную 96
Шахматное расположение трубок 138, 192, 215
Шайбы дроссельные 534
Шлак и его образование 53
Шлаковая прослойка в железе 61
Шлакоудаление жидкое 466
Шлакование трубных решеток 159
Шлаковый генератор 442
Шов заклепочный 119, 158, 379
Шотландские котлы 70

Щелевая цилиндрическая камера 215
Щелочение котлов 177, 284
Щиты 204

Экраны 171
Экранирование топки 196, 225
Экраны — поверхность нагрева 171
Экраны Ла Монта 531
Эластичность 65, 229
Электролиты и их действие на стенки котла 116
Элементы котла — стандартизация 186, 232, 368
Эллиптический паровой коллектор 211

Ящики массивные чугунные 323

Адамс 319
Адамсон 135
Аллер 65
Альми 195
Альбан 58, 197
Алеоти 14
Андерсон 103, 319
Андерсон—Лойола 295
Архимед 14

Бабкок и Вилькокс 217, 400, 504
Бабийо Шарль 297
Бандли 34
Бартол 66
Барлоу 39
Бек 13
Блек 28
Бельвиль 169, 395
Белидор 28
Бенкстон 334
Бенис 429
Бенсон 552
Берд 48
Бессемер 84
Бидль 322
Бласко де Гарай 15
Блекей 37
Блекинден 273, 385
Болтон 39
Бойер 225
Бранка Джиованни 17
Бранд 449
Бродерс 105
Броунтон Томас 426
Бурне 19
Буслей 250
Бюрель 336

Вагенкнехт 325
Вальтер 240
Велокс 539
Викорс 427
Виллн 110
Вилькокс Стефенс 217
Витте 320
Вудсон 465

Гак 327
Гартман 574
Геншель 448
Герон Александрийский 13
Герри 448
Гера 416
Герреншоф 189
Герни 250
Гестус 301
Гейторн 223
Гейне 199
Гиринг 319
Гирн 87
Гольц 210
Гоуден 416, 108, 136
Грин Эдуард 111
Грифич 197
Гюйо 254

Девиль 324
Де Дисна, Бутона и Трепарду 214
Дезагюлье 28
Дреземейер 337
Дерстон 153
Дженсон 340
Джебиз Кони 62
Джоли 168
Джонсон 503
Джукс 426
Долголенко 396
Донхэм 68
Дон 115
Дорсет 322
Дюрр 242
Дю-Тампль 251, 394

Жанвие 53

Зульцер 59

Иджин 327
Ижервуд 448
Ийтмей 76

Кавказ и Меркурий 321
Калашников 343
Каменский 326
Капуй 319
Карион 13
Карл V 15
Карелин 35, 50
Карно Сади 28
Кауф 535
Кеннеди 454
Кеми 111

Кертинг 343
Киннель 103
Кларк, Чэпмэн и К° 306
Кларксон 307
Клер-Девиль 324
Соломон де Ко 15
Колье 448
Коломбье 301
Колле 244
Кольтман 298
Кони Джебиз 62
Конзей 373
Кочбин-Дарбусьер 448
Кохран 304, 319
Крупп 307

Ла Монт 531
Лаграфель д'Аллест 203
Ладыженский 414
Ленц 278, 321
Леонардо да-Винчи 14
Летеб 115
Луддитов движение 29
Леопульд 28, 35
Леффлер 563
Линтон 323
Лоринг 265

Малэ 319
Маркс Карл 27, 28, 58
Мартин 76, 87
Маршалл 96, 157
Марстон 303
Матчос 15
Мемфорд 233
Менделеев 321
Мильтон 141
Майабар 248
Мори Самюэлль 39
Моррис 66
Моррисон 149
Мошер 269
Муспрат 54
Мэррик 60, 63, 64, 66

Наварет 15
Наполеон 324
Несмит 28
Нейнс 448
Никлосс 245, 399
Нифай 74
Нобель 321
Норман 257, 387
Норман-Сигоди 261
Ньюкомен 22

Оденэ 106
Ориоль 201
Орстон 115

Папин Дени 16
Пашнин 337
Пенн 88
Пенелль 212
Перкинс 187
Первес 148
Перси 115
Петерсон О. С. 343
Петрашевский 338
Петерсон-Макдональд 290
Пибоди 455
Пилок 407
Прюдон-Капюс 408
Пти и Годар 227

Рамзин Л. К. 577—590
Рамсей 39
Рей 361
Рид Катан 39
Рини 74
Ричардсон 326
Робер 513
Робертс 194
Руссель 136

Самон 448
Сампсон 232
Сандгрен 335
Сарани 327
Саймингтон 48
Свенсен Г. Д. 343
Северн Томас 20
Сидоров 22
Сеннет 93
Серв 206
Симпсон 28
Сименс К. 84, 327
Симингтон 115
Синяя книга 115
Ситон 215
Смитон 23
Солиани 152
Солиньяк-Гриль 226
Сопер 105
Сошэ 251
Сталин 547, 471
Стефенсон 71, 148
Стирлинг 292
Стивенс 39, 330
Стэкхауз 63

Таун 60, 63
Дю-Тампль 251
Тейлор 88
Томлинсен 63
Торникрофт 263, 374, 362
Торникрофт-Маршалл 299
Тоун 213
Тривитик 71

Уатт Джемс 26, 29, 115, 426
Уайт 281
Уорд 235, 272
Уотсон 105
Уилленс 102

Фельдгауз 15
Фернандо 103
Фербен 135
Филлипс 289
Фильд 168
Фитч 37, 115
Фишер 73
Флеминг и Фюргюсон 275
Фокс 139
Форстер 282

Фриндле 320
Фрисби 427
Фультон 39
Фут Генри 327

Хезлхорст 68
Херберт 115
Холл 136, 427
Хофман 115

Чэпмэн Кларк

Шенснович 338
Шихау 76, 101
Шмидт 572
Шоу 323
Шпаковский 321

Штейн Мюллер 207
Штроман 296
Шухов 303
Шютте 413

Эвенс 35
Эдоун 324
Эльдер Джон 536
Энгельс 40
Эйдон 329

Юнгстрем 418, 565

Янушевский 347
Ярроу 209, 284, 368, 373, 482, 485

60471

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие редактора 3
От автора 11

Глава I. ПЕРВЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

1. Первые попытки использовать пар 13
2. Прототип активной турбины — двигатель Бранка 17
3. Котел Папина 17
4. Котел и машина Севери 20
5. Котел и машина Ньюкомена 22
6. Котел Смитона 23
7. Основные причины появления универсального двигателя Уатта 26
8. Котлы и машины Уатта 29
9. Каменные и деревянные котлы 34
10. Котлы высокого давления Эвенса 35
11. Водотрубные котлы Блекея и Фитча 37
12. Водотрубные котлы Барлоу и Стивенса 39
13. Первые пароходы 39
Выводы 40
Использованная литература к I главе 41

Глава II. РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ В 20—60-х ГГ. XIX В.

Основные причины развития транспорта . . . . .
Новые требования к постройке и эксплоатации судовых котлов в период 20—60 гг. XIX в. 44 48
14. Уменьшение веса и габаритных размеров 48
15. Борьба за повышение к. п. д. котла 49
16. Повышение требований к топливам судовых паровых котлов 51
17. Сохранение в чистоте внутренних поверхностей нагрева котла 54
18. Повышение давления в котле. 57
19. Повышение паропроизводительности котла 58
20. Подготовка кадров 59
21. Простота и надежность работы котлов 60
Основные типы судовых паровых котлов в период 20—60 гг. XIX в. 60
Лабиринтные котлы 60
22. Котлы Мэррика и Тауна (США) 60
Котлы галерейного типа 62
23. Котлы Джебиз Кони (США) 62
24. Вторая конструкция котла Мэррика и Тауна (США) 63
25. Котлы Стэкхауза и Томлинсена (США) 63
26. Третья конструкция котлов Мэррика и Тауна (США) 64
27. Котлы завода Аллер (Allaire) (Нью-Йорк, США) 65
Коробчатые котлы 66
28. Котлы Морриса и К° (США) 66
29. Котлы Донхэма и К° (США) 68
30. Котлы Мэрри и Хезлхорста (США) 68
Цилиндрические оборотные котлы 70
31. Котлы Мот и Эриз (США) 70
Локомотивные котлы 70
32. Локомотивные котлы Морриса и К° (США) 71

Стр.
33. Общая характеристика судовых огнетрубных котлов 72
Водотрубные котлы 73
34. Котел Мэррика и сына (США) 73
35. Котлы Рини, Нифай и К° (США) 74
36. Котел Мартина (США) 76
37. Котлы Шихау (Германия) 76
Котлы высокого давления 76
38. Жаротрубный котел Йитмена и Шильда (США) 76
Выводы 77
Использованная литература ко II главе 81

Глава III. СУДОВЫЕ ОГНЕТРУБНЫЕ КОТЛЫ 70—90-х ГГ. XIX В.

Краткие сведения о развитии промышленности и транспорта в 70—90 гг. XIX в. 83
Основные требования к постройке и эксплоатации судовых паровых котлов во второй половине XIX в. . 85
39. Интенсификация работы судовых котлов 86
40. Повышение давления пара в котле 86
41. Применение перегретого пара 87
42. Естественная тяга 91
43. Искусственная тяга 92
44. Искусственная тяга посредством парового форсуна 92
45. Тяга посредством дымососов 94
46. Тяга непрямого действия 95
47. Дутье в закрытую котельную. 96
48. Дутье в закрытый зольник 100
49. Общие характеристики искусственной тяги 103
50. Подогреватели воздуха 107
51. Подогрев питательной воды 111
52. Водяной экономайзер Кемпа 111
53. Замена инжекционных холодильников-конденсаторов поверхностными . . 115
Конструкции судовых огнетрубных котлов 116
54. Низкие коробчатые котлы (Германия) 116
55. Плоскодонные (мокродонные) коробчатые котлы (Германия) 118
56. Ножные коробчатые котлы (Германия) 128
57. Овальные котлы (Англия) 129
58. Применение стали для постройки судовых котлов 130
59. Шотландские котлы 131
60. Шотландский котел 70-х гг. XIX в. (Англия) 133
61. Шотландский котел авизо «Pfeil» постройки 1882 г. (Германия) 133
62. Гладкие топки 135
63. Топка Адамсона 135
64. Двойные шотландские котлы на пароходе «Lessing» постройки 1882 г. (Германия) 136
65. Циркуляция воды в огнетрубных котлах 137
66. Дымогарные трубки 138
67. Двойной шотландский котел парохода «Saale» и топка Фокса (Германия). 139
68. Деформации в огнетрубных котлах 141
69. Защитные наконечники для огнетрубных котлов 146
70. Котлы императорской яхты «Гогенцоллерн» 1892 г. и топка Пёрвеса 1892 г. (Германия) 148
71. Топка Мориссона 149
72. Котел парохода «Rognwald» постройки 1884 г (Германия) 150
73. Котлы Солиани (Англия) 152
Пролетные котлы 152
74. Котел авизо «Zeiten» 1876 г. (Германия) 152
75. Котлы крейсера «Surprise» 1885 г. (Англия) 153
76. Котлы крейсера IV класса «Falke» постройки 1892 г. (Германия) 154
Локомотивные котлы 156
77. Локомотивные котлы миноноски класса «Schütze» 1882 г. (Германия) . . 156
78. Локомотивный котел китайского миноносца (Англия) 157
79. Мокродонные локомотивные котлы 1886—1887 гг. (Англия) 158
Борьба за распространение огнетрубных котлов . . . 160
Выводы 161
Использованная литература к III главе 164

Стр.

Глава IV. СУДОВЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ 70—90-х ГГ. XIX В.

80. Котел Фильда 168
Котлы группы Бельвиля 168
81. Котлы Бельвиля (Франция) 169
82. Котел Перкинса (Англия) 169
83. Котел Геррешофа (Англия) 187
84. Котел Робертса (США) 189
85. Котел Альми 194
Камерные водотрубные котлы 195
86. Котлы Альбана (Германия) 197
87. Котлы Гейне (Германия) 197
88. Котлы Ориоля (Франция) 199
89. Котлы Лаграфеля д'Аллеста 1887 г. (Франция) 201
90. Котлы Штейнмюллера (Германия) 203
91. Котлы Ярроу (Англия) 207
Катерные котлы 209
92. Огнетрубные катерные котлы 209
93. Котлы Гольца (Германия) 209
94. Котлы Пенелля (Франция) 211
95. Котлы Тоуна (США) 212
96. Котлы де-Диона, Бутона и Трепарду (Франция) 213
Секционные котлы 214
97. Котлы Ситона (Англия) 215
98. Котлы Бабкока и Вилькокса (США) 215
99. Котлы Гейторна (Англия) 217
100. Котлы Бойера (США) 223
101. Котел Солиньяка-Гриля (Франция) 225
Однокамерные котлы 226
102. Котлы Пти и Годара (Франция) 227
103. Котлы Мошера (США) 227
104. Котлы Торникрофта-Маршалла 228
105. Котлы Сампсона (Англия) 229
106. Котлы Мемфорда (Англия) 232
107. Котлы Уорда (США) 233
Котлы с циркуляционными трубками 235
108. Котлы Вальтера (Германия) 240
109. Котлы Дюрра (Германия) 240
110. Котлы Колле (Франция) 242
111. Котлы Никлосса (Франция) 244
Котел Мийабара (Япония) 245
Котлы треугольного типа 248
112. Котлы с циркуляционными трубками Герни и Сошэ 250
113. Котлы Дю-Тампля (Франция) 250
114. Котлы Нормана (Франция) 251
115. Котлы Нормана-Сигоди (Франция) 257
116. Котлы Торникрофта (Англия) 261
117. Котлы Мошера (США) 263
118. Котлы Уорда (США) 269
119. Котлы Блекиндена 272
120. Котлы Флеминга и Фергюсона (Шотландия) 273
121. Котлы Рида (Англия) 275
122. Котлы Ленца (Германия) 276
123. Котлы Уайта (США) 278
124. Котлы Коульса (США) 281
125. Котлы Ярроу (Англия) 282
126. Котлы Филиппса 284
127. Котлы Петерсона—Макдональда 289
Котлы Стирлинга 290
Комбинированные котлы 292
128. Котел Андерсона-Лайола (Англия) 295
129. Котел Штромана (Германия) 295
130. Котел Шарля Бабийо (Франция) 296
Вспомогательные котлы 297
131. Вспомогательный котел парохода «Hungaria» 1884 г. (Германия) 298
132. Котел Кольтмана 1885 г. 298

Стр.
133. Котел Гестуса 301
134. Котел Коломбиера (Colombier) 1880 г. (Франция) 301
135. Котел Марстона (Marston) 1882 г. (Англия) 303
136. Котел Шухова (Россия) 303
Вспомогательные котлы с дымогарными трубками . . 304
137. Котел Кохрана 1886 г. (Англия) 304
138. Котел судостроительного общества в Фленсбурге 305
139. Котел Кларка Чэпмэна и К° (Clarke Chapman C°) 1877 г. 306
140. Котел Ферфильда (Fairfield Shipbuilding) (Шотландия) 306
141. Котел Кларксона 307
142. Котел Круппа (Германия) 307
Выводы 308
Использование литературы к IV главе 314

Глава V. РАЗВИТИЕ НЕФТЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ НА СУДАХ

Замена угольного отопления нефтяным 317
143. Из истории нефтяного отопления 319
Сосудистые и колосниковые топки 322
144. Топка Бидля 322
145. Топка Шоу и Линтона 323
146. Топка Эдоуна (Aydoun). 324
147. Топка Клер-Девиля 324
148. Топка Вагенкнехта (Wagenkhecht) 325
149. Топка Ричардсона 326
150. Газовые топки. Топки Фута 327
Форсунки-пульверизаторы 329
151. Первый пульверизатор Шпаковского 329
152. Пульверизатор Эйдона 329
153. Второй пульверизатор Шпаковского 330
154. Форсунки Ленца 331
155. Форсунки Бенкстона 334
156. Форсунки Сандгрена 335
157. Форсунки Бюреля (Burell) 336
Применение нефтяного отопления в русском военном флоте 336
158. Топка Пашнина 337
159. Топка Дреземейера 337
160. Топка Шенсновича и Петрашевского 338
161. Воздушная форсунка Дженсона (Jensen) 1883 г. 340
162. Механические форсунки 342
163. Форсунка Кертинга 343
164. Результаты применения нефтяного отопления в русском военном флоте в конце 90-х г. XIX в. 344
Нефтяное отопление военных судов в иностранных флотах (90-е гг. XIX века) 351
165. Нефтяное отопление котлов миноносца № 22 351
166. Котел нефтяного отопления Гюйо 354
167. Смешанное отопление 356
Основные типы современных форсунок 360
168. Форсунки Шухова 360
169. Форсунки Торникрофта 360
170. Форсунка Рея 361
Выводы 363
Использованная литература к V главе 365

Глава VI. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ КОТЛОВ В НАЧАЛЕ XX ВЕКА

171. Общие тенденции в развитии судовых котлов начала XX века 367
Основные усовершенствования водотрубных котлов в 1900—1920 гг. 368
172. Английские котлы Ярроу 368
173. Германские котлы Ярроу 373
174. Котлы Торникрофта 374
175. Котлы системы Вулкан для эсминца «Новик» 375
176. Котлы Уайта—Форстера 383
177. Котлы Мошера 384

Стр.

178. Котлы Блекиндена 385
179. Котлы германского адмиралтейства 386
180. Котлы Нормана 387
181. Котлы Дю-Тампля—Гюйо 394
182. Котлы Бельвиля 395
183. Котлы Долголенко 396
184. Котлы Бельвиля—Долголенко 398
185. Котлы Никлосса 399
186. Котлы Бабкока и Вилькокса 400
Основные усовершенствования цилиндрических огнетрубных котлов в 1900—1935 гг. 402
187. Получение перегретого пара 402
188. Пароперегреватель Бютнера 404
189. Перегреватели Шмидта 405
190. Перегреватель системы Пилока (Pielock) 407
191. Котлы Прюдон-Капюса 408
192. Комбинированные (огнетрубные) котлы Шютте 413
193. Котел Ладыженского 414
194. Котел Гера 416
195. Котел Гоудена 416
196. Новейшая котельная установка Гоудена—Джонсона 417
Выводы 419
Использованная литература к VI главе 424

Глава VII. МЕХАНИЧЕСКИЕ ТОПКИ

197. Общий ход развития механических топок 426
198. Метательная топка 428
199. Переталкивающая топка 429
200. Цепная решетка 433
201. Топки с нижней подачей 436
Выводы 444
Использованная литература к VII главе 445

Глава VIII. РАЗВИТИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ В СУДОВЫХ УСТАНОВКАХ

202. Общий ход развития пылеугольного отопления 447
203. Опыты Бранда и английской фирмы Кларк Чэмпен и К° 449
204. Опыты американского государственного Управления судоходства . . . 452
205. Центральная система пылесжигания на пароходе «Mercer» 459
206. Индивидуальная система пылеприготовления парохода «West Alsek» . . 460
207. Кольцевая смешанная система пылеприготовления 462
208. Пылеугольное отопление водотрубных котлов 468
209. Пылеугольное отопление судовых котлов в СССР 471
Выводы 478
Использованная литература к VIII главе 478

Глава IX. СОВРЕМЕННЫЕ СУДОВЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ

210. Повышение требований к судовым водотрубным котлам 481
211. Котлы Ярроу повышенного давления 482
212. Котлы Ярроу новейшего английского адмиралтейского типа 485
213. Котлы парохода «Bremen» 497
214. Котел Джонсона 503
215. Котлы Бабкока и Вилькокса повышенного давления и типа SX-экспресс 504
216. Ребристые котлы 513
217. Котлы системы Вагнера 513
Выводы 527
Использованная литература к IX главе 528

Глава X. СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ И КОТЛЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Специальные конструкции судовых котлов 531
218. Котлы Ла Монта 531
219. Котел Велокса 539

Стр.

Судовые котлы высокого давления 547
220. Котлы Бенсона 547
221. Котлы Леффлера 552
222. Котлы Шмидта 563
223. Котел Гартмана 572
224. Применение пара высокого давления в СССР 574
225. Прямоточные котлы Зульцера 577
Выводы 590
Перспективы применения пара высокого давления и высокого перегрева на судах 592
226. Применение пара высокого давления и высокого перегрева 593
227. Увеличение к. п. д. паросиловых установок при применении регенеративного процесса в турбинах 593
Выводы 598
Использованная литература к X главе 600
Заключение 600

42799

Стр.
547
552
563
572
574
577
590
592

593
593

598
600
600
605

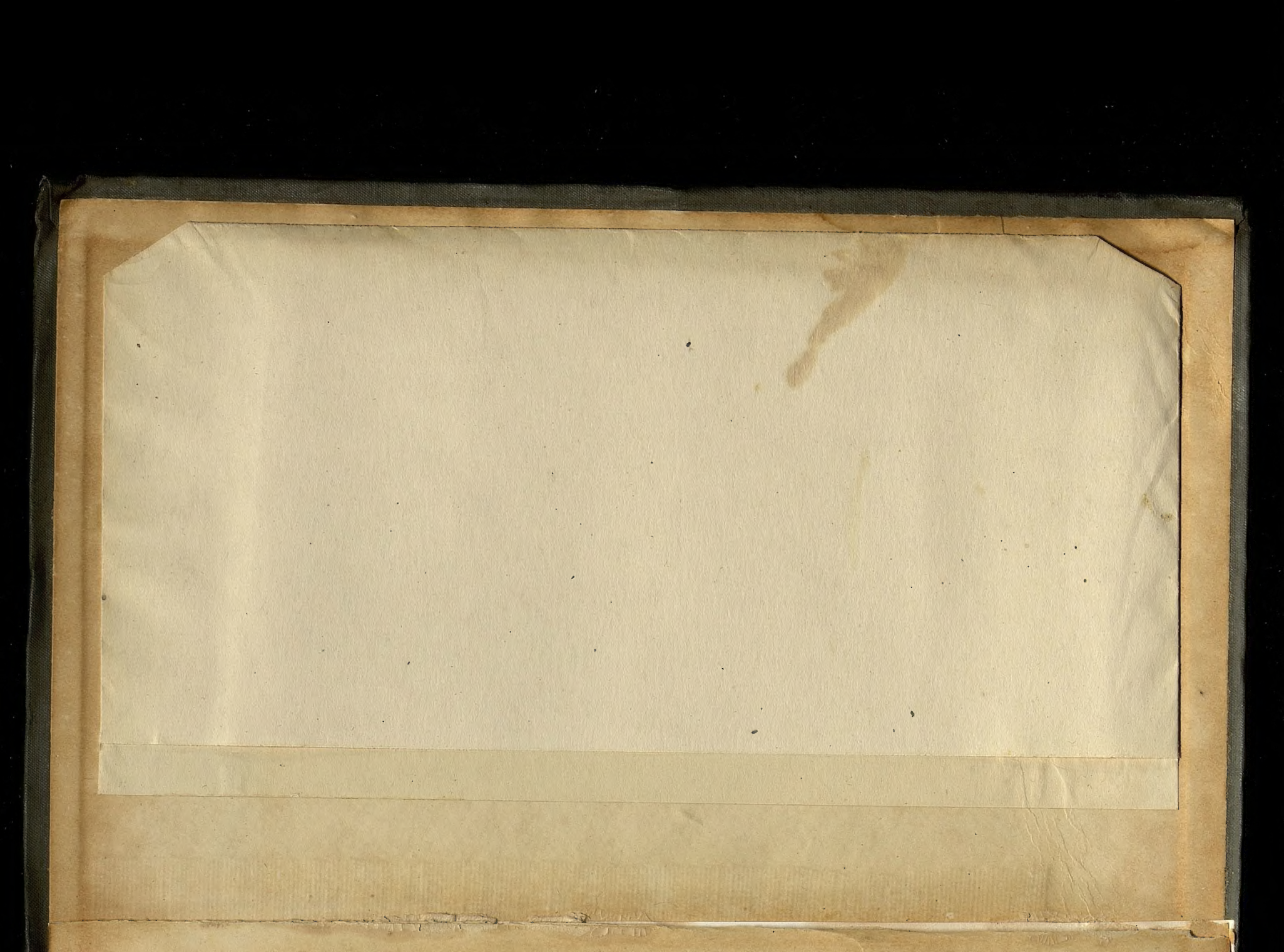


Таблица 129а

Примерные данные о применении различных типов и систем судовых котлов в военных флотах к 1935 г.[1]

Системы котлов

Наименование стран	Группы кораблей[2]	Ярроу			Цилиндрические огнетрубные			Бабкока и Вилькокса			Ярроу или У. Ф.			Уайт Форста			Бельвиля		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений[3]	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений
Англия[4]	I	83	4774	н.	1	20	н.	11	735	н.	—	—	—	2	70	н.	3	36	у.
	I	3	107	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	96	3039	н.	9	50	н.	2	12	н.	83	2228	н.	—	—	—	—	—	—
	II	11	22	с.	39	52	у.	1	3	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	4	12	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		196	7954		49	122	—	14	750	—	83	2228	—	2	70	—	3	36	—
» » » к 20 г.		83	2991		49	—	—	—	—	—	43	1172	—	2	70	—	3	36	—
США	I	7	656	н.	1	7	н.	11	306	н.	—	—	—	4	112	н.	—	—	—
	II	13	327	н.	14	58	н.	23	88	н.	—	—	—	1	4	н.	—	—	—
	II	—	—	—	3	20	с.	4	21	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		20	983	—	18	85	—	38	415	—	—	—	—	5	116	—	—	—	—
» » » к 20 г.		14	653	—	18	85	—	34	309	—	—	—	—	5	116	—	—	—	—
Япония	I	1	22	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	2	8,8	у.	1	17	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	47,5	у.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	2	190	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		5	220,8	—	1	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	47,5	у.
» » » к 20 г.		3	30,8	—	1	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	47,5	
Франция	I	2	46	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	115	у.
	II	11	117	с.	13	34	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	1	44	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		13	163	—	14	78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	115	—
» » » к 20 г.		12	142	—	14	78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	115	—
Италия	I	15	1480	н.	—	—	—	2	52	с.	—	—	—	—	—	—	1	20	с.
	I	2	70	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	2	50	у.	1	5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	25	294,5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	4	88	с.	1	2	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		48	1982,5	—	2	7	—	2	52	—	—	—	—	—	—	—	1	20	—
» » » к 20 г.		9	230	—	2	7	—	2	52	—	—	—	—	—	—	—	1	20	—
Германия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	I	10	759	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	2	90	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	1	28	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	2	10	н.	1	5	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	4	6,2	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		19	893,2	—	1	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		6	129,1	—	1	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	2	10,2	с.	6	41,9	у.	—	—	—	—	—	—	1	8	с.	—	—	—
	—	1	5,5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	13	4,5	у.	6	50	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	11	251	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	11	161,6	у.	3	14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	17	339	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	—	—	—	—	3	33,5	у.	2	13	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	4	52	н.	2	14	н.	2	90	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	3	6	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	11	332	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	3	20,7	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	1	37	н.	5	20,2	у.	1	69	н.	—	—	—	5	150	с.	3	20	у.
Бразилия	—	9	72	у.	—	—	—	2	5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	1	34	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	2	50	с.	1	12,5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	28	876,5	н.	5	13,3	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	2	10	с.	—	—	—	2	20	у.	—	—	—	—	—	—	1	19	у.
	—	5	87,4	н.	—	—	—	5	5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Финляндия	—	2	2,3	у.	2	6,6[7]	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Польша	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Румыния	—	2	2,3	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всего к 1935 г.	—	475	14290,6	—	118	520,6	—	69	1453,9	—	83	2228	—	13	344	—	16	257,5	—
Всего к 1920 г.	—	226	5702,3	—	111	465	—	60	1346	—	43	1172	—	13	344	—	16	257,5	—
Всего к 1935 г. в % от 1920 г.	—	210	250	—	117	112	—	115	108	—	192,5	190,0	—	100	100	—	100	100	—

Наименование стран	Группы кораблей[2]	В и W, У. Ф. тип „SX"			Bureau Express тип Торникрофт			Торникрофта			Нормана			Норм. Яр., У. Ф.			Никлосса		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений
Англия[4]	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
США	I	18	2021	н.	3	85	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	4	—	—	4	28	н.	3	10	н.	1	8,0	у.	185	5000	н.	—	—	—
	II	—	—	—	1	1	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	25	62,5	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		18	2021	—	33	176,5	—	3	10	—	[illegible]	[illegible]	—	[illegible]	5000	[illegible]	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	29	148,5	—	1	4	—	1	8	—	185	5000	—	—	—	—
Япония	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	9,4	у.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	1	0,6	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	1	0,6	—	—	—	—	—	—	—	1	9,4	у.
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	1	0,6	—	—	—	—	—	—	—	1	9,4	—
Франция	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	39	н.	—	—	—	8	229	у.
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	38	н.	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	42	у.	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	119	—	—	—	—	8	229	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	99	—	—	—	—	8	229	—
Италия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	26	у.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	70	1360,7	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	3	10,3	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	73	1371	—	—	—	—	—	—	—	2	26	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	49	679	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Германия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	I	—	—	—	—	—	—	1	7	у.	1	7	у.	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13	56	н.	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	1	7	—	14	63	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	1	7	—	14	63	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	—	—	—	—	—	—	1	4	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	—	—	—	—	—	—	3	3	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	—	—	—	—	—	—	—	4	150	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2,8	у.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	6	168	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	3	66,5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	4	80	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Финляндия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Польша	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	77,8	у.	—	—	—	—	—	—
Румыния	—	—	—	—	—	—	—	4	192	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всего к 1935 г.	—	22	2101	—	33	176,5	—	99	1972,1	—	43	267,8	—	185	5000	—	12	267,2	—
Всего к 1920 г.	—	—	—	—	30	155,5	—	9	78,1	—	37	170	—	185	5000	—	12	267,2	—
Всего к 1935 г. в % от 1920 г.	—	—	—	—	110	113	—	1100	2520	—	116	157	—	—	—	—	100	100	—

Наименование стран	Группы кораблей[2]	Кампона			Конзей тип Ярроу			Мийабара			Дю-Тампля			Шульц—Торникрофта		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений
Англия[4]	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
США	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Япония	I	30	2608	н.	3	87,25	н.	2	96	н.	—	—	—	—	—	—
	I	13	845	с.	2	90	с.	1	18	у.	—	—	—	—	—	—
	I	2	27	у.	—	—	—	2	90	с.	—	—	—	—	—	—
	II	72	2715,5	н.	9	358	н.	16	276	н.	—	—	—	—	—	—
	II	7	14	с.	23	496	с.	1	6,5	с.	—	—	—	—	—	—
	II	5	13,5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		129	6223	—	37	1031	—	22	488	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		46	2283	—	30	842	—	14	458	—	—	—	—	—	—	—
Франция	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	57	у.	3	88	с.
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	91	3126	н.	1	18	у.
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	20	у.	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	95	3203	—	4	106	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	38	241	—	4	106	—
Италия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	52	у.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	94	н.
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	146	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	146	—
Германия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	195	н.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	62	с.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	176	у.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	276	н.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	148	с.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	у.
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39	858	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	341	—
Испания	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	70	у.
Аргентина	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	11,2	н.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	154,3	н.
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Финляндия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Польша	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Румыния	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всего к 1935 г.	—	129	6223	—	37	1031	—	22	488	—	95	3203	—	54	1345,5	—
Всего к 1920 г.	—	46	2283	—	30	842,25	—	14	458	—	38	241	—	38	828,5	—
Всего к 1935 г. в % от 1920 г.	—	281	272	—	123	122,5	—	157	106,5	—	250	1330	—	142	167	—

Наименование стран	Группы кораблей[2]	Шульца			Гюйо			Разные[5]			Блекиндена			Шихау		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах *л. с.*	Системы отоплений
Англия[4]	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
США	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Япония	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Франция	I	—	—	—	9	1158	н.	11	887[6]	н.	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	13	22	у.	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	9	1158	—	24	909	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	13	22	—	—	—	—	—	—	—
Италия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	52	с.	1	27,4	у.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	25	н.	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	77	—	1	27,4	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	77	—	1	27,4	—
Германия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	37	67	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		37	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		37	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех клас. корабл. к 35 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» » » к 20 г.		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	—	2	1	у.	—	—	—	10	13	у.	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	9	16,2	у.	—	—	—	7	104,4	н.	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Финляндия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Польша	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Румыния	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всего к 1935 г.	—	48	84,2	—	9	1158	—	41	1026,4	—	3	77	—	1	27,4	—
Всего к 1920 г.	—	48	84,2	—	—	—	—	25	41	—	3	77	—	1	27,4	—
Всего к 1935 г. в % от 1920 г.	—	100	1000	—	—	—	—	161	2500	—	100	100	—	100	100	—

[1] В таблицу не вошли данные о котлах лишь для небольшого числа судов, для которых не были указаны системы котлов в справочнике Jane's fighting ships, London, 1935 (по материалам данного справочника составлена таблица). Также не приводятся данные о кораблях части флотов, не имеющих боевого значения.
[2] К I группе кораблей отнесены линкоры, крейсера и авианосцы. Ко II группе отнесены лидера, эсминцы, сторожевики и другие суда.
[3] В столбцах „системы отопления" буква н. обозначает нефтяное, с. — смешанное и у. — угольное отопление.
[4] В крупных флотах, как английский, США, японский, французский, германский, итальянский и испанский, сведения о судовых котлах даны для двух групп классов кораблей. В остальных флотах разбивка классов кораблей на группы не сделана.
[5] В столбец „разные системы водотрубных котлов" внесены те суда, для которых неизвестно точно, какой системы котлы на них установлены (сюда относятся водотрубные котлы, двухколлекторные и котлы треугольного типа).
[6] Во французском флоте в столбце „разные водотрубные котлы" приведены для следующих систем котлов:

число судов	6	5	13
система котлов	Indret	Pehoct	водотрубн.
суммарная мощность котлов	528 тыс. *л. с.*	359 тыс. *л. с.*	22 тыс. *л. с.*

[7] Локомотивные.

Таблица 99

Примерные данные о применении различных типов и систем судовых котлов в военных флотах к 1920 г.[1]

Системы котлов (часть 1)

Наименование стран	Группы кораблей [2]	Ярроу			Бабкока и Вилькокса			Ярроу или Wite Forster			W. Forster			Бельвиля			Цилиндр. огнетруб.			Нормана, Ярроу, Форстера		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления [3]	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления
Англия [4]	I	45	2047	н.	11	735	н.	—	—	—	2	70	н.	3	36	у.	1	20	н.	—	—	—
	I	3	107	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	25	803	н.	2	12	н.	43	1172	н.	—	—	—	—	—	—	9	50	н.	—	—	—
	II	11	22	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39	52	у.	—	—	—
	II	4	12	у.	1	3	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли		88	2991	—	14	750	—	43	1172	—	2	70	—	3	36	—	49	122	—	—	—	—
США	I	1	26	н.	7	200	н.	—	—	—	4	112	н.	—	—	—	1	7	н.	—	—	—
	II	13	327	н.	23	88	н.	—	—	—	1	4	н.	—	—	—	14	58	н.	185	5000	н.
	II	—	—	—	4	21	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	20	с.	—	—	—
Всех классов корабли	—	14	653	—	34	309	—	—	—	—	5	116	—	—	—	—	18	85	—	185	500	—
Япония	I	1	22	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	2	8,8	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	47,5	у.	1	17	у.	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	3	30,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	47,5	—	1	17	—	—	—	—
Франция	I	1	25	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	115	у.	—	—	—	—	—	—
	II	11	117	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	44	н.	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13	34	у.	—	—	—
Всех классов корабли	—	12	142	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	115	—	14	78	—	—	—	—
Германия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Италия	I	2	70	с.	2	52	с.	—	—	—	—	—	—	1	20	с.	1	5	у.	—	—	—
	I	2	50	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	у.	—	—	—
	II	1	22	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	4	88	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	9	230	—	2	52	—	—	—	—	—	—	—	1	20	—	2	7	—	—	—	—
Испания	I	2	910	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	1	28	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	2	10	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	5	с.	—	—	—
	II	1	1,1	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	6	129,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	5	—	—	—	—
Китай	I	2	10,2	с.	—	—	—	—	—	—	1	8	с.	—	—	—	6	41,9	у.	—	—	—
	I	1	5,5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	I и II	13	4,5	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	28	у.	—	—	—
Швеция	I	10	131,6	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	10	у.	—	—	—
	II	3	3	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	4,6	у.	—	—	—
Турция	I	—	—	—	1	12	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	21	у.	—	—	—
Аргентина	—	4	52	н.	2	90	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	3	6	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	3	20,7	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	11	332	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	1	37	н.	1	69	н.	—	—	—	5	150	с.	3	20	у.	5	20,2	у.	—	—	—
Бразилия	—	9	72	у.	2	5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	1	34	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	2	50	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	12,5	у.	—	—	—
	—	25	704,5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	13,3	н.	—	—	—
Греция	—	2	10	с.	2	20	у.	—	—	—	—	—	—	1	19	у.	—	—	—	—	—	—
	—	5	87,4	н.	5	5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	226	5702,3	—	60	1346	—	43	1172	—	13	344	—	16	257,5	—	111	465	—	185	5000	—

Системы котлов (часть 2)

Наименование стран	Группы кораблей [2]	Нормана			Торникрофта			Bureau Express тип Торникрофта			Никлосса			Мийабара			Кампона			Конзей тип Ярроу		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления
Англия [4]	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
США	I	—	—	—	—	—	—	3	85	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	1	8,0	у.	1	4	н.	25	62,5	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	1	1	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	1	8,0	—	1	4	—	29	148,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Япония	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	96	н.	14	1066	н.	3	87,25	н.
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	9,4	у.	1	18	у.	2	27	у.	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	90	с.	10	648	с.	2	90	с.
	II	—	—	—	1	0,6	у.	—	—	—	—	—	—	8	246	н.	20	542	н.	9	358	н.
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	6,5	— с.	—	—	—	16	307	с.
Всех классов корабли	—	—	—	—	1	0,6	—	—	—	—	1	9,4	—	14	458	—	46	2283	—	30	842,25	—
Франция	I	1	39	н.	—	—	—	—	—	—	8	229	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	1	18	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	100000	с.
	II	20	42	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	22	99	—	—	—	—	—	—	—	8	229	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Германия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Италия	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	26	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Испания	I	1	7	у.	—	—	—	1	7	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	13	56	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	14	63	—	—	—	—	1	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	I и II	1	4	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	3	3	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2,8	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	3	66,5	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	37	170	—	9	78,1	—	30	155,5	—	12	267,2	—	14	458	—	46	2283	—	30	842,25	—

Системы котлов (часть 3)

Наименование стран	Группы кораблей [2]	Дю-Тампля			Шульц—Торникрофта			Шульца			Гюйо			Разные [5]			Блекиндена			Шихау		
		Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления	Число судов	Суммарная мощность котлов в тысячах л. с.	Система отопления
Англия [4]	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
США	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Япония	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Франция	I	2	57	у.	3	88	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	34	164	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	2	20	у.	1	18	у.	—	—	—	—	—	—	13	22	у.	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	38	241	—	4	106	—	—	—	—	—	—	—	13	22	—	—	—	—	—	—	—
Германия	I	—	—	—	12	176	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	1	16	с.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	9	148	с.	37	67	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	1	1	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	23	341	—	37	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Италия	I	—	—	—	2	52	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	25	н.	1	27,4	у.
	I	—	—	—	2	94	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	52	с.	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	4	146	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	77	—	1	27,4	—
Испания	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Всех классов корабли	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Китай	I	—	—	—	—	—	—	2	1	у.	—	—	—	10	13	у.	—	—	—	—	—	—
	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Португалия	I и II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Швеция	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Турция	I	—	—	—	1	70	у.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	4	11,2	н.	9	16,2	у.	—	—	—	2	6	н.	—	—	—	—	—	—
Голландия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	2	154,3	н.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Чили	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бразилия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Австралия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Греция	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	38	241	—	38	828,5	—	48	84,2	—	—	—	—	25	41	—	3	77	—	1	27,4	—

[1] В таблицу не вошли данные о котлах лишь для небольшого числа судов, для которых не были указаны системы котлов в справочнике Jane's fighting ships. 1921 г. Лондон (по материалам данного справочника составлена таблица). Также не приводятся данные о кораблях части флотов, не имеющих боевого значения.
[2] К I группе кораблей отнесены линкоры, крейсера и авианосцы, ко II группе кораблей отнесены лидера, эсминцы, сторожевики и другие суда.
[3] В столбцах система отопления буква н. обозначает нефтяное, с.— смешанное и у.— угольное отопление.
[4] В крупных флотах, как английский, США, японский, французский, германский, итальянский и испанский, сведения о судовых котлах даны для двух групп кораблей. В остальных флотах разбивка кораблей на группы не сделана.
[5] В столбец разные системы водотрубных котлов внесены те суда, для которых неизвестно точно, какой системы котлы на них установлены (сюда относятся водотрубные котлы, двухколлекторные и котлы треугольного типа).

Зак. 4081.— Развитие судовых паровых котлов.